

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA PROJETO DE
TRANSFORMADORES UTILIZADOS EM FONTES
DE ALIMENTAÇÃO CHAVEADAS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.

CLÁUDIO LUÍS EBERT

FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 1997.

**PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA
PROJETO DE TRANSFORMADORES UTILIZADOS
EM FONTES DE ALIMENTAÇÃO CHAVEADAS**

CLÁUDIO LUÍS EBERT

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA, ESPECIALIDADE ENGENHARIA
ELÉTRICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-
GRADUAÇÃO.**

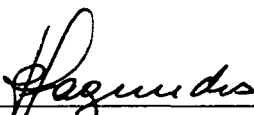


Prof. João Carlos dos Santos Fagundes, Dr.
Orientador



Prof. Adroaldo Raizer, Dr.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA:



Prof. João Carlos dos Santos Fagundes, Dr.



Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing.



Prof. Enio Valmor Kassick, Dr.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia de projeto de transformadores para uso em frequência elevada, utilizados em fontes de alimentação chaveadas. A partir de estudos analíticos sobre os principais parâmetros envolvidos no projeto, a metodologia definida é implementada através do desenvolvimento de um programa computacional.

A implementação de tal programa é feita tomando como suporte básico o software Borland Delphi, que combina uma interface gráfica, um compilador Pascal e um banco de dados.

Dentre os objetivos deste trabalho destaca-se a otimização conjugada à facilidade no projeto do transformador, além da precisão e da possibilidade de se considerar parâmetros que normalmente são desprezados, muito embora importantes.

O programa implementado é composto por telas de projeto, telas para seleção de materiais, um algoritmo matemático e bancos de dados. Dentre os bancos de dados destacam-se o dos materiais ferrimagnéticos (ferrites) de alguns fabricantes, e o dos núcleos, onde tem-se todas as características necessárias do mesmo. Desta forma o usuário dispõe rapidamente de informações decisivas no projeto e que, dada a estrutura do programa, podem ser completadas e atualizadas.

Para a verificação dos projetos feitos via programa computacional, montou-se um inversor ponte completa, onde o transformador tem uma onda quadrada simétrica em seu enrolamento primário.

A partir dos resultados obtidos experimentalmente comprova-se a eficácia do programa, a facilidade no projeto do transformador, bem como um funcionamento adequado do mesmo, validando desta forma a metodologia de projeto adotada.

ABSTRACT

This work presents a methodology of high frequency transformer design for implementation in a computational program.

The software used as basic support is the Borland Delphi. This software has an object-oriented visual programming, a pascal code-compiler and a database tools.

The objectives of the work are to optimize and to facilitate the transformer design, and also, to allow the consideration of important parameters that are usually neglected.

The computational program comprises a design screen, the material selection screen, mathematical algorithm and database. The most important databases are the magnetic material and the core database, whose have all necessary characteristics of the core.

For verification of the transformer design, made using the program, a full bridge inverter have been built, having in this primary winding an alternative square wave.

With the results obtained it is possible to confirm the facility in the transformer design and to validate the design methodology.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	01
CAPITULO I - NÚCLEOS MAGNÉTICOS DE FERRITES.....	07
1.1 Materiais magnéticos.....	07
1.2 - Aspectos térmicos referentes aos materiais magnéticos.....	14
1.3 - Aspectos geométricos.....	15
1.3.1. Determinação dos parâmetros geométricos dos núcleos.....	15
1.3.2. Apresentação de Ae e Wa.....	16
1.3.3. Determinação do caminho magnético médio.....	17
1.3.4. Determinação do comprimento médio de uma espira.....	17
1.3.5. Consideração das dimensões do carretel.....	19
1.3.6. Conclusões.....	20
CAPÍTULO II - ESTUDO DOS PARÂMETROS DE PROJETO	
PARA O TRANSFORMADOR.....	21
2.1 - O projeto do transformador.....	21
2.2 - Princípios básicos.....	22
2.2.1 - Determinação das densidades de fluxo e de corrente.....	25
2.2.2 - Fator de utilização da janela do núcleo.....	28
2.3 - Cálculo dos enrolamentos do transformador.....	31
2.3.1 - Cálculo do número de espiras dos enrolamentos do transformador.....	32
2.3.2 - Cálculo da bitola do condutor.....	34
2.4 - Conclusões.....	35

CAPÍTULO III - METODOLOGIA DE PROJETO	36
3.1 - Banco de dados.....	36
3.1.1 - Banco de dados do material magnético.....	37
3.1.2 - Banco de dados dos núcleos.....	38
3.2 - Cálculos efetuados pelo programa.....	39
3.2.1 - Seqüência de cálculos efetuados pelo programa.....	39
3.2.2 - Determinação do Ku no programa computacional.....	47
3.2.2.1 - Isolamento dos condutores.....	48
3.2.2.2 - Agrupamento de condutores em paralelo.....	48
3.2.2.3 - Área ocupada pelo carretel.....	56
3.2.2.4 - Isolamento entre camadas.....	58
3.3 - Fluxograma.....	60
3.4 - Conclusões.....	61
CAPÍTULO IV - EXEMPLO DE PROJETO.....	62
4.1 Exemplo de projeto.....	62
4.1.1 - Passo 1: Execução do programa.....	62
4.1.2 - Passo 2 - Seleção do que se deseja calcular.....	64
4.1.3 - Passo 3 - Escolha do material magnético.....	65
4.1.4 - Passo 4 - Escolha do condutor.....	67
4.1.5 - Passo 5 - Seleção da forma de onda.....	68
4.1.6 - Passo 6 - Escolha do conversor a ser utilizado	69
4.1.7 - Passo 7 - Calcular o transformador.....	70
4.2 - Visita à biblioteca de núcleos.....	71
4.3 -Conclusões.....	73

CAPÍTULO V - ENSAIOS PARA VERIFICAÇÃO DOS	
RESULTADOS.....	74
5.1 - Resultados experimentais para verificação da metodologia empregada no cálculo do fator de utilização da janela do núcleo.....	74
5.2 - Ensaios realizados para validação dos projetos feitos via computador.....	78
5.3 - Resultados Experimentais.....	81
5.3.1 - Formas de onda no inversor.....	81
5.3.2 - Resultados obtidos nos ensaios com transformadores.....	82
5.3.2.1 - Ensaio nº 1 - Transformador de 143 W - 50KHz.....	82
5.3.2.2 - Ensaio nº 2 - Transformador de 300W - 50KHz.....	87
5.3.2.3 - Ensaio nº 3 - Transformador de 600W - 100KHz.....	90
5.3.2.4 - Ensaios nº 4, nº 5 e nº 6 - Transformador de 300W - 100KHz.....	92
5.3.2.5 - Ensaios nº 7 e nº 8 - Transformador de 180W - 50 e 100KHz.....	94
5.3.2.6 - Ensaios nº 9 e nº10 - Transformador de 300W - 50KHz.....	96
CONCLUSÕES GERAIS.....	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

INTRODUÇÃO

A tecnologia aplicada em conversores estáticos vem sofrendo grandes modificações, devido, entre outros fatores, à aplicação destes conversores em equipamentos embarcados, à necessidade de economia de energia e também devido ao custo destes equipamentos.

A maximização da eficiência, bem como, da densidade de potência em conversores estáticos, estimulada pelos setores aeroespaciais, militares e da informática, tem sido foco de pesquisa de laboratórios de diversas partes do mundo. Isto tem levado à pesquisa e desenvolvimento de componentes e topologias de conversores que permitam a operação destes em níveis de eficiência e frequência cada vez mais elevadas.

O aumento da frequência de chaveamento em conversores estáticos permite a redução do volume e peso de seus componentes reativos, tendo como consequência a elevação da densidade de potência, podendo também resultar em respostas dinâmicas mais rápidas. Mas, por outro lado, existem fatores que limitam este aumento da frequência, dos quais pode-se destacar o aspecto térmico. A redução do volume e, portando da área de dissipação de calor, exige que a perda total seja minimizada a fim de limitar a temperatura de operação, ou seja, existe um compromisso entre a maximização da potência e da eficiência.

Considerando-se que os elementos magnéticos são, na maioria das vezes, os elementos de maior volume e peso, além de serem grandes dissipadores de energia, estes devem ser objeto de muita atenção no projeto. Mas, apesar dos avanços das pesquisas em novas técnicas de comutação, topologias e componentes de chaveamento, permitindo a operação dos conversores em frequências mais elevadas, a

evolução na área de componentes magnéticos não tem ocorrido na mesma proporção. A otimização do projeto destes componentes, visando minimizar sua perda total e maximizar sua densidade de potência, é uma tarefa complexa no desenvolvimento de conversores estáticos operando em frequência elevadas. O que pode ser observado é que poucas técnicas para otimização destes elementos magnéticos foram até o momento desenvolvidas. Estas constituem-se, na sua maioria, em técnicas simplificadas que não levam em consideração, na maioria das vezes, as características do material empregado nem os efeitos causados pela operação em alta frequência.

O presente trabalho contempla ainda uma tendência cada vez mais valorizada na realização das mais diversas atividades, que é o uso do computador.

O uso da informática nos dias de hoje é indispensável quando se quer um trabalho otimizado, num intervalo de tempo reduzido. A vantagem advinda com isto é que, ao invés de realizar tarefas repetitivas, o homem passa a criar e desenvolver melhorias no que já existe, deixando o trabalho repetitivo a encargo do computador, e outros equipamentos comandados por este.

A partir da necessidade verificada da otimização do projeto de elementos magnéticos, associada ao fato de facilitar o mesmo, o que se propõe é o desenvolvimento de um programa computacional para o dimensionamento de elementos magnéticos.

Dentro desta abordagem, poucos trabalhos foram encontrados na literatura especializada. A maioria das publicações limitam-se a um determinado ponto, sendo, quase na sua totalidade, direcionadas à pesquisa do material magnético e as suas perdas, ou ao material do enrolamento, não explorando o projeto como um todo.

Dentre os trabalhos encontrados, relata-se a seguir os considerados de maior importância, seguindo nesta exposição uma ordem cronológica de publicação, não havendo nenhuma preferência no que se refere à importância de cada um.

Um dos primeiros artigos encontrados sobre o tema é do autor Jim C. Coleman (1992), onde este apresenta um Software para redução do tempo e custo no projeto de um transformador de potência. Segundo o autor, o software permite a modelagem a partir de múltiplas iterações até chegar nas ótimas características, mas muitas decisões do projeto ainda são confiadas no conhecimento e experiência do projetista.

Neste caso, o projeto do elemento magnético começa com a determinação do tamanho do transformador para a potência desejada, e este é definido pelo produto de áreas, $W_a A_e$ (área da janela do núcleo x área da seção transversal da perna central do núcleo), necessário para a frequência de operação. Na sequência faz o balanço de perdas, e calcula os condutores.

Outro trabalho publicado nesta mesma área, é o artigo de Gary L. Ingram (1993): “CAE (engenharia auxiliada por computador) auxilia na otimização do projeto de indutor e transformador”. Neste artigo, o autor coloca que, tendo como origem a seleção do fio, o método CAE considera como efeitos de segunda ordem a elevação da temperatura, efeito pelicular, correntes parasitas, efeito de proximidade, correntes CA e CC, e as perdas no núcleo.

Também cita que importantes considerações são feitas quanto ao tamanho, custo, elevação da temperatura e eficiência, mas raramente o projetista está seguro da otimização, ou do correto funcionamento do projeto.

Idealmente, segundo o autor, um meio computacional para projeto de indutores e transformadores deveria contemplar os seguintes aspectos:

- Ter uma biblioteca de núcleos padrões e permitir a montagem de uma biblioteca personalizada, adequada aos padrões da indústria;
- Ter um método para a seleção do condutor que permita explorar rapidamente todas as opções possíveis;
- Ser provido de funções independentes, além de ter um vínculo dinâmico entre a seleção do núcleo e o enrolamento para os projetos de indutores e transformadores, podendo ser usado um seletor automático para produzir um projeto inicial; e
- Permitir a comparação entre projetos com diferentes combinações de núcleos e enrolamentos.

Concluindo, o autor diz que o método CAE ajuda na produção de um projeto ótimo, permitindo ajustá-lo a diversas necessidades, economizando um tempo considerável e eliminando erros de cálculos.

Ainda nesta mesma linha de ação, foi publicado o artigo intitulado: “Software para cálculo de parâmetros de transformadores” (Cláudio L. Ebert e João C. S. Fagundes (1993)), que tem como objetivos principais: a facilidade, a rapidez e a eficiência no projeto de transformadores para uso em alta frequência. Neste software, o usuário entra com dados como correntes e tensões de entrada e saída, e obtém como resposta a bitola do condutor, número de espiras, bem como o núcleo a ser utilizado. O projeto, para este caso, é baseado numa metodologia já consagrada na literatura, sendo feita apenas a automatização dos cálculos com ajuda do computador. Com isso, foi alcançada a minimização de erros e a rapidez nos cálculos.

Em 1994 P.Viarouge, atuando no INEP/UFSC, propõe uma nova metodologia de projeto associada a um programa computacional, usando como suporte o programa Microsoft Excel.

A metodologia proposta parte da minimização das perdas totais, encontrando-se a relação entre as perdas magnéticas e as perdas Joule e, conseqüentemente, a densidade de corrente e a densidade de fluxo magnético ótimas para estas mínimas perdas.

Partindo do que foi visto nesta parte introdutória, onde procurou-se analisar a situação atual desta abordagem, considera-se relevante o estudo e desenvolvimento de uma metodologia apropriada para o cálculo de transformadores para o uso em alta frequência.

Esta metodologia é associada a um programa computacional, agora utilizando-se o programa Borland Delphi, para que, de maneira simples e precisa, realize-se os cálculos e obtenha-se um projeto ótimo do transformador em tamanho, custo e rendimento. Esta otimização decorre do máximo aproveitamento das características de cada material aplicado, havendo a necessidade, no entanto, de um grande conhecimento da variedade de materiais e de como estes podem ser utilizados nos seus limites.

Com o desenvolvimento deste programa, estes dados passam a ser apenas de conhecimento do programa, necessitando o usuário tão somente de informações essenciais para o projeto, tais como: frequência de operação, tensões e correntes, tipo de conversor (opcional), e outros de fácil acesso.

O programa segue, então, uma metodologia de cálculos composta por equações e bancos de dados fornecidos em catálogos de fabricantes, ou desenvolvidos através de estudo analítico.

É importante salientar que sobre muitos dos parâmetros que são extremamente significativos em um projeto para componente magnético operando em alta frequência não se dispunham de estudos analíticos precedentes, tendo que ser

desenvolvidos para o presente trabalho. Ainda mais, tais parâmetros, pela quantidade e complexidade, não poderiam ser considerados em projeto sem a ajuda do computador.

A partir do dimensionamento do transformador via programa computacional, tem-se como resultados principais o material e o tipo de núcleo que devem ser utilizados, com a possibilidade de troca deste(s), caso não esteja(m) disponíveis ao usuário. Em todos os casos, o programa fornecerá os melhores parâmetros para cada núcleo.

Além do material e do tipo do núcleo serão fornecidas as bitolas, o número de espiras, o número de condutores em paralelo e as resistências CA e CC de cada enrolamento, levando-se em consideração o Efeito Pelicular e o Efeito de Proximidade, além de outras informações com respeito a isolamento e normas internacionais.

Enfim, o que se deseja deste programa é que ele seja adequado tanto para indústria como para pesquisa, fornecendo projetos de grande confiabilidade em tempo reduzido.

CAPÍTULO I - NÚCLEOS MAGNÉTICOS DE FERRITES

O presente trabalho inicia-se com o levantamento e estudo de alguns importantes parâmetros dos núcleos magnéticos de ferrites, que são utilizados nas fontes de alimentação chaveadas. Os parâmetros a serem analisados dizem respeito a aspectos geométricos, térmicos, e ao material magnético dos quais são compostos os núcleos.

1.1 Materiais Magnéticos

A primeira análise a ser feita é a dos materiais magnéticos, dando maior enfoque às perdas associadas a estes materiais.

Nos projetos de transformadores para uso em alta frequência utiliza-se os materiais ferrimagnéticos, ou ferrites, que são materiais cerâmicos magnéticos de alta resistividade, compostos de óxido de ferro, como por exemplo, MnFe_2O_4 e NiFe_2O_4 .

As perdas magnéticas para um determinado material podem obtidas através da seguinte equação:

$$P_v = C_m \cdot f^x \cdot B^y \quad (1.1)$$

onde:

P_v = Perdas volumétricas (W/m^3)

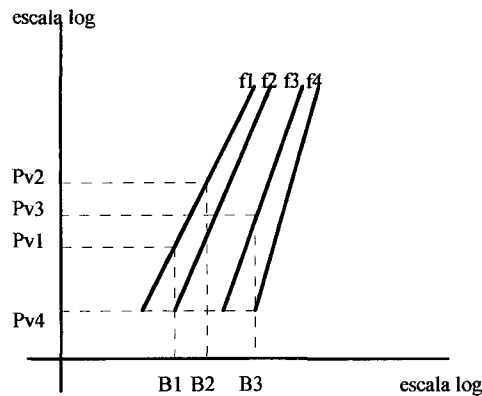
f = frequência de operação (Hz)

B = densidade do fluxo magnético (T)

C_m , x e y = coeficientes do material. (y é denominado de expoente de Steinmetz).

Estes coeficientes são obtidos dos gráficos de perdas dos materiais em relação à frequência para uma determinada densidade de fluxo, encontradas nos manuais dos fabricantes. Devido ao fato destes gráficos, quando traçados em escala logarítmica, serem compostos por retas, pode-se facilmente obter as inclinações destas e, através de algumas expressões matemáticas, determinar os referidos coeficientes. Esta metodologia para o cálculo dos coeficientes é apresentada em artigo publicado por Rudy Severns (1991). Uma forma simplificada desta metodologia é apresentada a seguir, onde tem-se um gráfico das perdas volumétricas fornecidas pelos fabricantes em escala logarítmica, e as equações para a obtenção dos coeficientes.

FIGURA 1.1 - Gráfico das perdas volumétricas x densidade de fluxo



Onde: f_1, \dots, f_4 : frequência [KHz]

P_{v1}, \dots, P_{v4} : perda volumétrica [mW/cm^3]

B_1, \dots, B_3 : densidade de fluxo [Gauss]

A partir do gráfico e das equações que se seguem pode-se obter facilmente os coeficientes C_m , x e y .

$$y = \left[\frac{\log P_{v1} - \log P_{v2}}{\log B_1 - \log B_2} \right] \quad (1.2)$$

$$x = \left[\frac{\log Pv3 - \log Pv4}{\log f3 - \log f4} \right] \quad (1.3)$$

$$Cm = \log^{-1}(\log Pv3 - y \cdot \log B3 - x \cdot \log f3) \quad (1.4)$$

Colhendo-se dados da literatura ou aplicando a referida metodologia nos casos em que os coeficientes não são fornecidos diretamente, pode-se construir a tabela 1.1.

TABELA 1.1 - Cm , y e x para diferentes materiais magnéticos.

MATERIAL	x	y	Cm
3C80 (100°C)	1,30	2,50	16,70
3C81 (100 °C)	1,40	2,50	7,00
3C85 (100°C) 20-100KHz	1,30	2,50	11,00
3C85 (100°C) 100-200KHz	1,50	2,60	1,50
SIFERRIT N27 (não especificado)	1,39	2,19	6,55
3F3 (100°C) (20-300KHz)	1,60	2,50	0,25
3F3 (100°C) (>300KHz)	1,80	2,50	0,02
3F4 (100°C) (500-1000KHz)	1,75	2,90	12×10^{-2}
4F1 (100°C) (3000-10000KHz)	1,35	2,25	9,00
IP10 (23°C)	1,21	2,24	19,39
IP6 (23°C)	1,18	2,34	69,63

Os materiais apresentados na tabela 1.1 são de fabricação da Philips, com exceção do IP6 e IP10 que são de fabricação da Thornton.

A partir dos dados da tabela 1.1 e da equação 1.1 pode-se obter as perdas volumétricas (P_v) de cada material, em função da frequência e da densidade de fluxo em que está trabalhando. A evolução destes valores para alguns materiais magnéticos estão representados nos gráficos das figuras 1.2, 1.3 e 1.4:

FIGURA 1.2 - Perdas volumétricas x frequência, para $B=0,10$ T

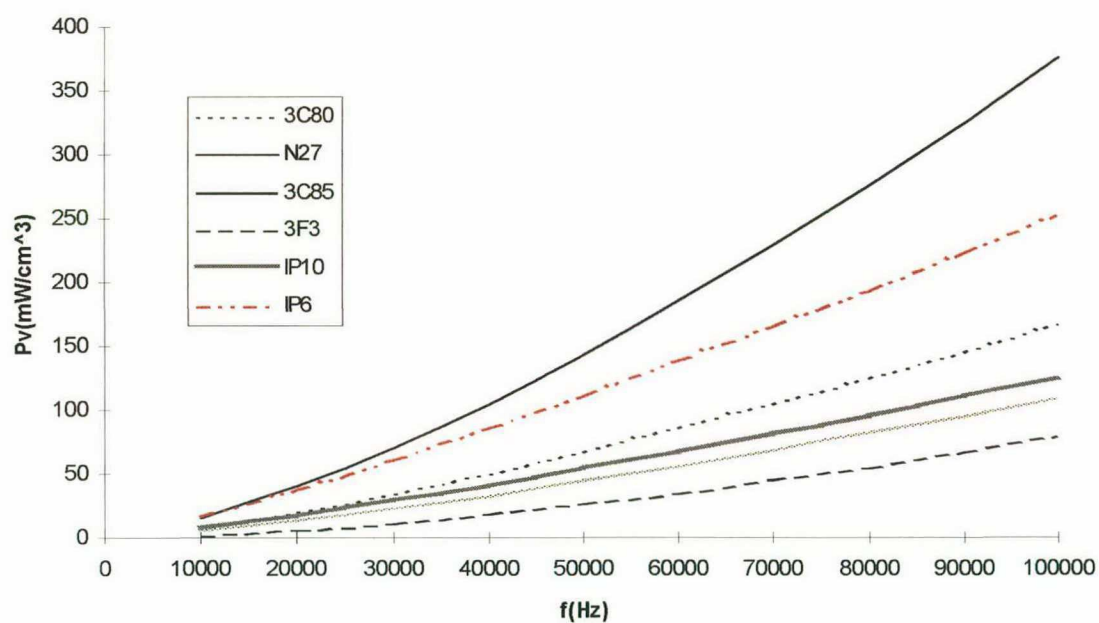
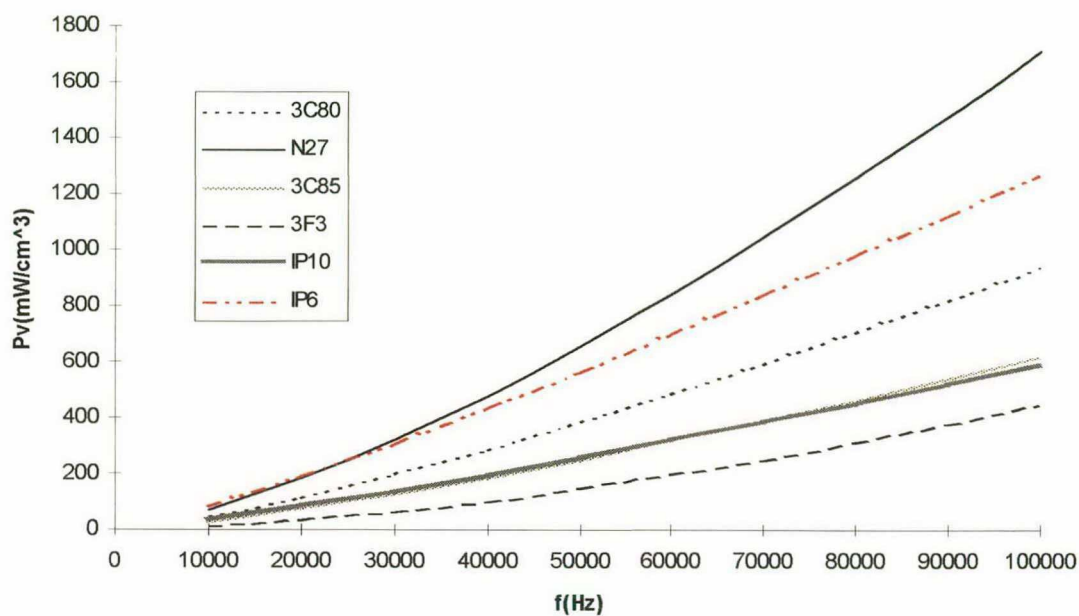
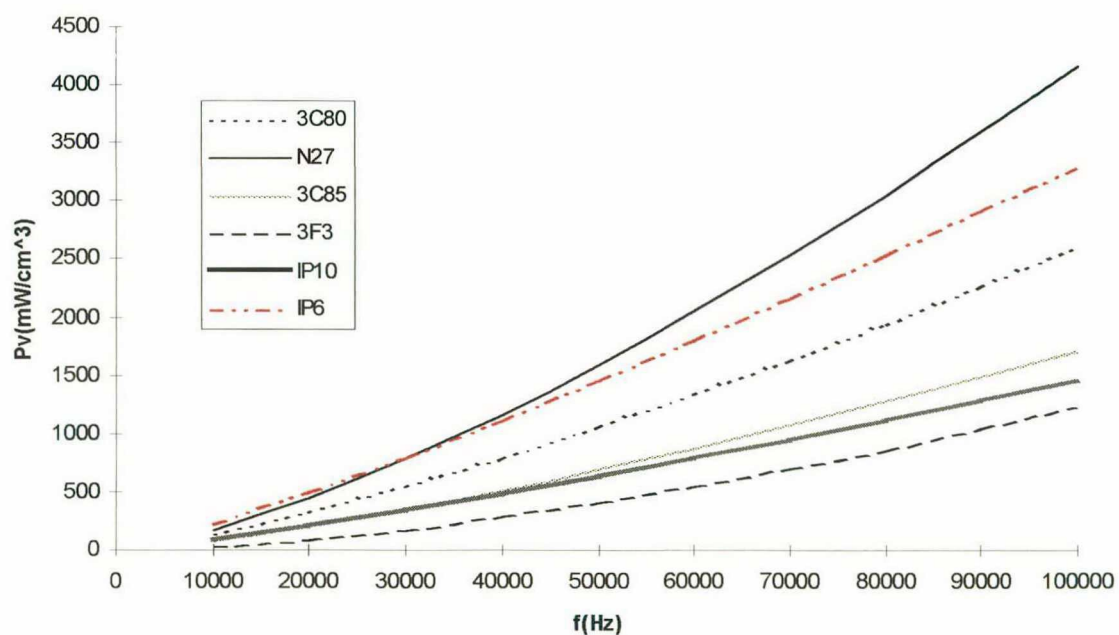


FIGURA 1.3 - Perdas volumétricas x frequência, para $B=0,2$ TFIGURA 1.4 - Perdas volumétricas x frequência, para $B = 0,3$ T

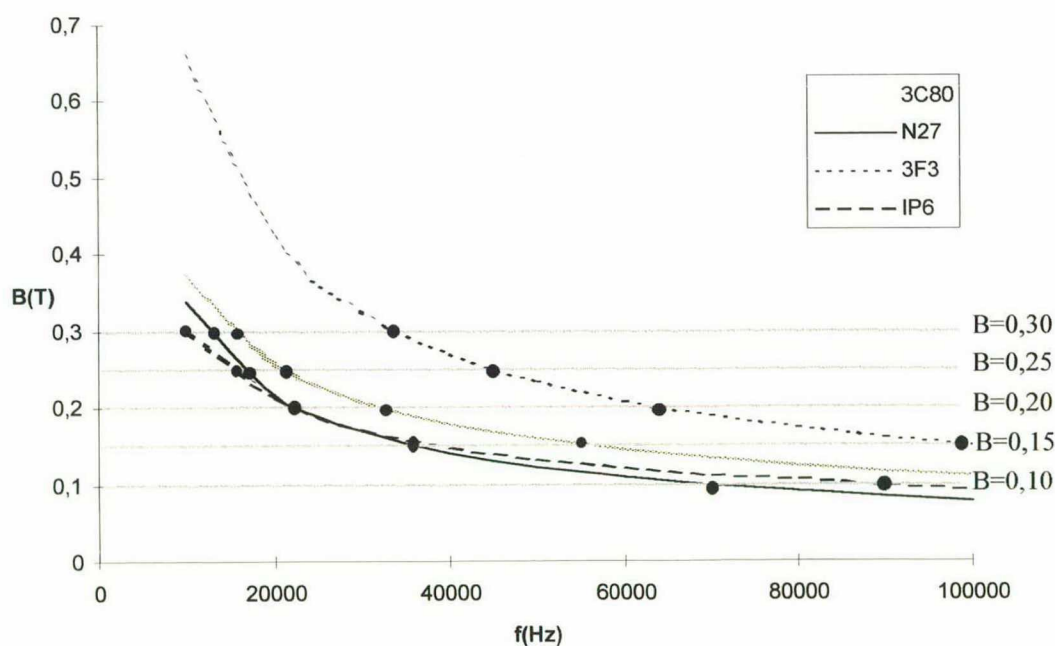
Pode-se observar nos gráficos apresentados uma grande elevação das perdas quando se eleva a frequência ou quando há uma maior densidade de fluxo. Este

é um fato que deve ser observado no momento do projeto, pois quanto maior a frequência de operação, menor deverá ser a densidade de fluxo a ser adotada. Outra informação importante obtida a partir dos gráficos anteriores é diferença entre os materiais, onde por exemplo o material 3F3 tem perdas 3 vezes menores que o material N27, isto significa que o material 3F3 pode ser utilizado em frequências mais elevadas ou com densidade de fluxo maior, para uma mesma perda volumétrica.

Considerando-se uma perda volumétrica constante, e igual a 220mW/cm^3 , pode-se traçar um gráfico com a máxima densidade de fluxo para uma determinada frequência sem que as perdas ultrapassem o valor estimado.

Adotou-se uma perda de 220mW/cm^3 devido ao fato que diversos tipos de materiais, entre eles o 3B7, 3C80, 3C81, 3E2A e IP10, quando submetidos em ensaios à uma temperatura de 100°C , densidade de fluxo de $0,1\text{T}$ e frequência de 100KHz , apresentam uma perda volumétrica entre 200 e 250mW/cm^3 .

FIGURA 1.5. - Relação $B \times f$ para $P_v = 220 \text{ mW/cm}^3$



A partir deste gráfico, pode-se montar a tabela mostrada a seguir, onde encontram-se os valores de máxima densidade de fluxo para uma determinada faixa de frequência. De fato existe um produto $f \times B$ ótimo para cada caso.

Cabe observar que a região, na qual o material pode ser utilizado, sem ultrapassar as perdas desejadas, situa-se à esquerda do ponto em que a curva característica do material cruza com a reta da densidade de fluxo.

TABELA 1.2. - Determinação de B para determinadas faixas de frequência, com

$$P_v = 220 \text{ mW/cm}^3$$

MATERIAL	B	f (KHz)
3C80	0,30	< 16
	0,25	< 22
	0,20	< 33
	0,15	< 57
	0,10	< 130
N27	0,30	< 13
	0,25	< 17
	0,20	< 23
	0,15	< 35
	0,10	< 67
3F3	0,30	< 34
	0,25	< 45
	0,20	< 65
	0,15	< 100
	0,10	< 200
IP6	0,30	< 10
	0,25	< 15
	0,20	< 22
	0,15	< 40
	0,10	< 90

A partir desta breve análise dos materiais já pode-se observar que a escolha do material é de fundamental importância no projeto, sob pena de ter-se perdas volumétricas muito elevadas, o que irá traduzir-se por elevação de temperatura

indesejada, podendo até mesmo comprometer o funcionamento do elemento magnético.

1.2-Aspectos térmicos referentes aos materiais magnéticos

O estudo térmico para qualquer componente de uma fonte de alimentação é de fundamental importância quando se deseja um projeto confiável e seguro.

Para o material magnético existem duas temperaturas que devem ser observadas, quais sejam: a temperatura Curie e a temperatura para mínimas perdas, que serão discutidas a seguir. Além destas temperaturas, num projeto completo deve-se observar também a máxima temperatura permitida para que se não se destrua os isolamentos dos condutores e o isolamento entre os enrolamentos.

Uma maior importância deve ser dada quando da operação em altas frequências, pois como dito na parte introdutória deste trabalho, com o aumento da frequência há uma diminuição de peso e volume dos elementos magnéticos e, conseqüentemente, uma redução na área de dissipação de calor. Além disso, tem-se um aumento da densidade de potência, provocando maiores perdas, fazendo com que o elemento magnético atinja elevadas temperaturas se o projeto não estiver adequado às condições de operação.

Para o caso das ferrites, devido às propriedades semicondutoras, sua resistividade diminui com o aumento da temperatura, e como efeito há um aumento das perdas por correntes circulantes.

Quanto maior for a temperatura, menor será a indução magnética de saturação. À temperatura Curie, esta indução se anula e o material se torna paramagnético. A partir destas características uma temperatura ideal para o funcionamento deve ser encontrada.

De acordo com gráficos publicados em manuais de materiais magnéticos fornecidos por fabricantes de núcleos de ferrite, cada material tem uma determinada temperatura onde suas perdas são menores. Esta temperatura também depende da faixa de frequência em que está operando.

A partir destes gráficos, montou-se um quadro onde encontra-se a temperatura para a qual tem-se as mínimas perdas para cada tipo de material magnético.

TABELA 1.3 - Temperaturas para mínimas perdas

Material	Temperatura para mínimas perdas à		
	100KHz e 100mT	500KHz e 50mT	1MHz e 30mT
3C81	50°C	--	--
3C80	80°C	--	--
3C85	95°C	65°C	--
3F3	80°C	60°C	60°C
3F4	--	80°C	65°C

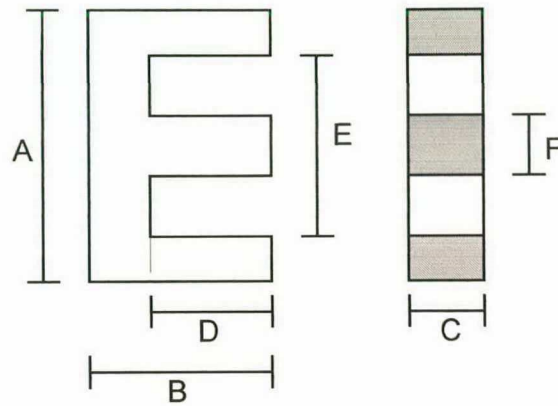
A partir dos dados desta tabela e das resistências térmicas de cada material, pode-se encontrar a potência ideal em que o núcleo magnético pode operar com mínimas perdas. Isto será melhor detalhado quando da apresentação da metodologia de projeto a ser utilizada.

1.3 - Aspectos geométricos

1.3.1 - Determinação dos parâmetros geométricos dos núcleos

Os parâmetros geométricos dos núcleos são definidos, como mostrado na figura 1.6.

Figura 1.6 - Parâmetros geométricos para núcleo magnético tipo E

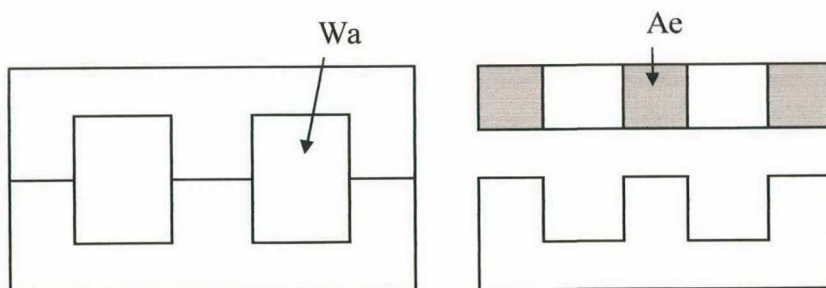


Esta notação mostrada na figura 1.6 é, em geral, a adotada para apresentação de núcleos magnéticos em catálogos de fabricantes.

1.3.2 - Apresentação de Ae e Wa

Os parâmetros Ae e Wa estão relacionados à geometria do núcleo, como pode ser observado na figura 1.7. Ae representa a área da secção transversal da perna central do núcleo e Wa é definida como sendo a área da janela do núcleo.

FIGURA 1.7 - Núcleo magnético com combinação E-E.



Os valores Ae e Wa, são calculados da seguinte maneira:

$$Ae = C.F \quad (1.5)$$

$$W_a = \left[\frac{(E - F)}{2} \right] \cdot 2 \cdot D = (E - F) \cdot D \quad (1.6)$$

Já o valor A_p , que representa o produto de áreas, como o próprio nome já diz, é resultado do produto entre A_e e W_a . Este valor é utilizado em muitas metodologias de projeto para a determinação do núcleo magnético.

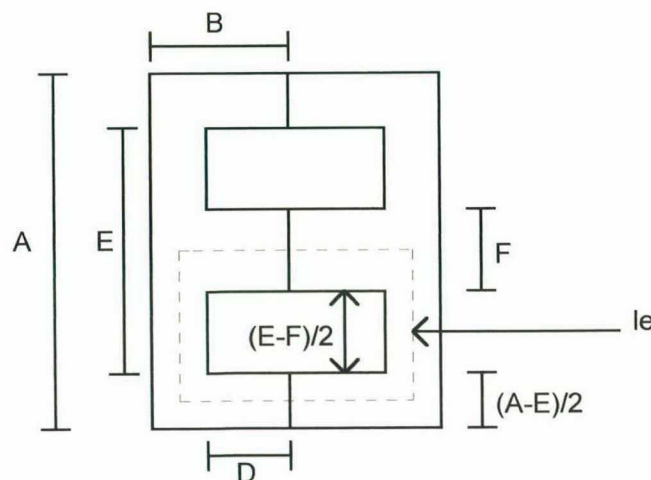
1.3.3 - Determinação do caminho magnético médio

O parâmetro l_e , comprimento do caminho magnético médio percorrido pelo fluxo magnético, depende da configuração adotada para o núcleo (E-E, E-I,....).

Considerando-se a configuração E-E, como mostra a figura 1.8, tem-se:

$$l_e = 2 \cdot (B + D) + \left[\frac{(A + 3 \cdot E - 2 \cdot F)}{4} \right] \quad (1.7)$$

FIGURA 1.8 - Caminho magnético médio para uma combinação E-E

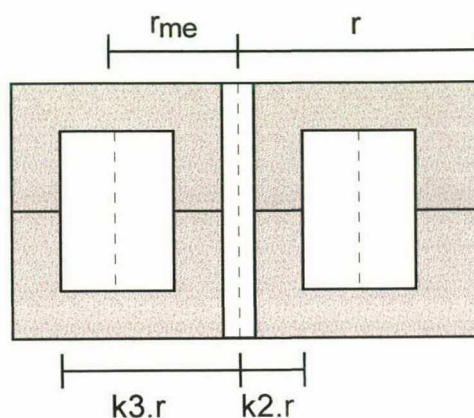


1.3.4 - Determinação do comprimento médio de uma espira

O comprimento médio de uma espira (MLT) também depende da forma do núcleo a ser usado. Por exemplo, se o núcleo for do tipo pote ou EC conforme figura (1.9), cuja perna central é cilíndrica, o comprimento é dado por:

$$MLT = \pi \cdot r \cdot (k_2 + k_3) \quad (1.8)$$

FIGURA 1.9 - Corte transversal de núcleo tipo pote



Para um núcleo com a perna central retangular ou quadrada, como mostrado na figura (1.10), e considerando que toda a área da janela é ocupada pelo enrolamento, tem-se:

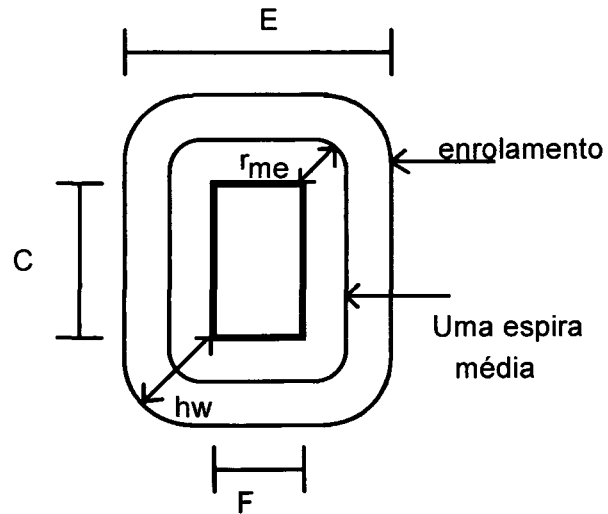
$$h_w = \frac{(E - F)}{2} \quad \text{ou} \quad \text{ainda} \quad r_{me} = \frac{(E - F)}{4} \quad (1.9)$$

Assim:

$$MLT = 2.(C + F) + 2.\pi.\frac{(E - F)}{4} \quad (1.10)$$

Cabe salientar que nas equações 1.9 e 1.10 a espessura do carretel não é considerada. No caso da consideração desta, as medidas F e C sofrem modificações, conforme o carretel a ser usado.

FIGURA 1.10 - Comprimento médio de uma espira (MLT)



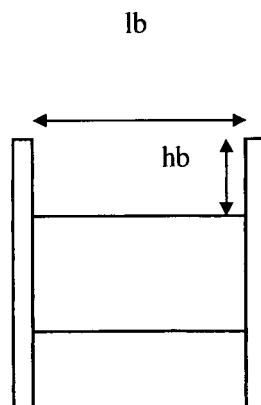
r_{me} = raio médio da curvatura da espira ($hw/2$)

hw = espessura da bobina

1.3.5 - Consideração das dimensões do carretel

Os parâmetros lb e hb são referentes às medidas do carretel, como mostra a figura (1.11). Estas medidas são importantes para a determinação do espaço disponível para alocação dos enrolamentos.

FIGURA 1.11 - Desenho simplificado de um carretel



A área efetiva disponível para acomodação dos enrolamentos (W_{ae}) é dada pelo produto das medidas $l_b \times h_b$.

1.3.6 - Conclusões

A partir das análises feitas dos diferentes materiais magnéticos que compõem os núcleos, das especificações térmicas destes materiais, e dos aspectos geométricos dos núcleos, pode-se observar que se todos estes parâmetros forem levados em consideração, o projeto do elemento magnético se torna uma tarefa muito complexa.

Também pode-se observar que se estes dados não forem considerados corretamente o projeto poderá levar a um componente magnético que não funcione de maneira adequada.

Desta forma, para buscar-se o dimensionamento preciso e completo dos componentes magnéticos necessita-se recorrer ao apoio computacional, através da definição de uma metodologia de projeto e sua implementação.

CAPÍTULO II - ESTUDO DOS PARÂMETROS DE PROJETO PARA O TRANSFORMADOR

O presente capítulo trata do estudo dos parâmetros necessários à realização de um projeto de transformador para uso em alta frequência.

Busca-se através deste estudo determinar como intervêm no projeto os referidos parâmetros, de maneira a se obter expressões matemáticas, ábacos e tabelas que possam facilmente ser utilizados posteriormente, de forma sistemática, em um projeto via computador.

2.1- O projeto do transformador

Inicialmente, para que se tenha claro quais os parâmetros que devem ser levados em conta no projeto, deve-se fazer uma breve consideração sobre os princípios básicos envolvidos no mesmo.

A partir de especificações elétricas e térmicas pode-se estabelecer uma formulação para a concepção do transformador. Tais especificações devem considerar a potência aparente, a frequência, o fator de forma de onda, a elevação de temperatura e a temperatura ambiente.

Destas especificações obtêm-se a densidade de fluxo magnético e a densidade de corrente ideal para cada núcleo, e na seqüência obtêm-se os demais parâmetros necessários para a montagem do transformador.

2.2 - Princípios básicos

A potência aparente de um transformador é dada pela somatória dos produtos Volt X Ampère nos seus enrolamentos. Assim sendo, tem-se:

$$S = \sum_{k=1}^N V_k \cdot I_k \quad (2.1)$$

onde: N = número de enrolamentos;

V_k = Valor eficaz da tensão nos terminais do enrolamento k ; e

I_k = Valor eficaz da corrente no enrolamento k .

O valor instantâneo da tensão em um determinado enrolamento é dado por:

$$v_k = n_k \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

onde: ϕ = fluxo instantâneo em uma espira do enrolamento

n_k = número de espiras no enrolamento k

Tomado-se como exemplo uma tensão senoidal

$$v_k = V \cdot \cos \omega t = n_k \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.3)$$

Como resultado da derivação tem-se

$$\phi = \frac{V}{n_k \cdot \omega} \sin \omega t \quad (2.4)$$

Considerando a secção transversal do núcleo, por onde passa o fluxo:

$$\phi = B \cdot Ae \quad (2.5)$$

Logo:

$$B = \frac{V}{n_k \cdot \omega \cdot Ae} \sin \omega t \quad (2.6)$$

O valor máximo da densidade de fluxo é:

$$B_{max} = \frac{V}{n_k \cdot \omega \cdot Ae} = \frac{V_{ef} \cdot \sqrt{2}}{n_k \cdot \omega \cdot Ae} = \frac{V_{ef} \cdot \sqrt{2}}{n_k \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot Ae} \tag{2.7}$$

Daí:

$$V_{ef} = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot n_k \cdot f \cdot Ae \cdot B_{max} \tag{2.8}$$

Tem-se que $\frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}}$ é uma constante que depende da forma de onda aplicada sobre o enrolamento (neste caso Kv = 4,44).

Chega-se desta maneira na seguinte equação:

$$V_k = n_k \cdot k_v \cdot A_e \cdot B_{max} \cdot f \tag{2.9}$$

A_e = área da secção transversal da perna central do núcleo;

B_{máx} = máxima densidade de fluxo magnético;

f = frequência de operação;

Kv = fator da forma de onda da tensão v_k.

De forma similar, através da aplicação da equação 2.2, pode-se obter o valor Kv para diferentes formas de onda. Alguns de valores de Kv são apresentados na tabela 2.1.

TABELA 2.1 - Fator de forma de onda

Forma de onda	k _v
Senoidal	2π/√2 = 4,44
Quadrada Simétrica	4
Quadrada Assimétrica	2

Voltando a formulação básica, tem-se que a soma dos valores eficazes das forças magnetomotrizes (fmm) de cada enrolamento é dada por:

$$\sum_{k=1}^n n_k \cdot I_k = J \cdot \sum_{k=1}^n n_k \cdot S_{cu_k} = J \cdot S_{cu} = Ku \cdot J \cdot W_a \quad (2.10)$$

onde:

J = densidade de corrente

S_{cu_k} = área da secção transversal do condutor no do enrolamento k

W_a = área da janela do núcleo

Ku = fator de utilização

S_{cu} = área da secção transversal total de cobre do enrolamento

Substituindo-se (2.9) em (2.1) vem:

$$S = \sum_{k=1}^n n_k \cdot K_v \cdot A_e \cdot B \cdot f \cdot I_k \quad (2.11)$$

E entrando com (2.10) em (2.11) tem-se:

$$S = Ku \cdot K_v \cdot f \cdot B \cdot J \cdot A_e \cdot W_a \quad (2.12)$$

Que é a potência aparente que pode ser obtida de um determinado núcleo, respeitando-se a elevação de temperatura estimada.

Analisando-se a expressão (2.12) tem-se que:

- O fator K_v depende tão somente da forma de onda aplicada, o que deve ser conhecido do projetista;
- A frequência f é um dado de projeto;
- O fator Ku pode ser determinado, à priori, e posteriormente refinado.

A partir destas considerações vê-se que, para cada núcleo magnético (produto $A_e \cdot W_a$ conhecido) há que determinar-se quais os valores de B e J que possibilitam obter-se a máxima potência aparente. Em outras palavras, uma vez

definido o núcleo há que buscar-se critérios e definir expressões matemáticas para calcular B e J.

2.2.1 - Determinação das densidades de fluxo e de corrente

A determinação das densidades de fluxo e de corrente pode ser feita a partir de considerações térmicas tais como a elevação de temperatura. A elevação de temperatura é, por definição, a diferença entre a temperatura no ponto mais quente do elemento magnético (T_p) e a temperatura ambiente (T_a), ou seja, $\Delta T = T_p - T_a$.

Do ponto de vista prático, esta elevação de temperatura representa a diferença entre a temperatura ideal para que se tenha mínimas perdas, considerada no ponto mais quente do núcleo magnético, e temperatura ambiente.

É comumente aceito que o ponto mais quente está localizado ao centro da coluna central do núcleo e que a diferença de temperatura entre este ponto e aquele localizado diretamente na superfície desta coluna é desprezível. Assim, é usual medir a temperatura do ponto mais quente neste local.

A temperatura ambiente a adotar é um valor questionável, pois esta depende de onde o elemento está operando, se ao ar livre, se dentro de um gabinete sem ventilação ou se ele recebe uma determinada refrigeração, podendo portanto assumir diversos valores.

O valor da elevação da temperatura também pode ter valores diferentes do mencionado anteriormente, ou seja, não ser o valor para que se atinja a temperatura para mínimas perdas. Isto pode ocorrer em casos onde o quantidade de calor emitida deve ser pequena, não podendo portanto o elemento magnético operar à temperatura ideal do material. O que deve prevalecer nestes casos é o bom senso do projetista, e ter-se-á um projeto que pode não estar otimizado.

Além das considerações térmicas, o aspecto geométrico também deve ser considerado para a determinação de B e J. Isto porque deve-se considerar a resistência térmica do núcleo, a qual depende da geometria do mesmo. A resistência térmica pode ser calculada pela expressão $R_{th}=23.Ap^{-0,37}$ [20], onde Ap é o produto de áreas já definido.

Para um dado núcleo, considerando-se f e ΔT fixados, pode-se determinar a relação ótima entre as perdas Joule e as perdas magnéticas, de maneira a maximizar a potência de saída [21]. Para que não haja elevação de temperatura acima do desejado, ou seja, acima da temperatura para mínimas perdas, a máxima perda total admissível deve obedecer a seguinte relação:

$$P_{tot} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (2.13)$$

Onde : P_{tot} = perdas totais no elemento magnético, que representa a soma entra as perdas Joule e as perdas magnéticas.

R_{th} = resistência térmica do núcleo

Com a expressão (2.14) pode-se determinar a distribuição de perdas Joule e magnéticas para que se consiga maximizar a potência de saída do transformador.

$$\left(\frac{dP_{tot}}{dB} \right)_{B=B_{\acute{o}timo}} = 0 \quad (2.14)$$

onde:

$$P_{tot} = P_J + P_{mag} \quad (2.15)$$

As perdas Joule relativas aos secundários do transformador são dadas por:

$$P_J = R_{eq} \cdot I_2^2 = R_{eq} \cdot \left(\frac{P_2}{V_2} \right)^2 \quad (2.16)$$

Onde: R_{eq} = resistência equivalente dos enrolamentos secundários

Como:

$$V_2 = n_2 \cdot Kv \cdot f \cdot B \quad (2.17)$$

Então:

$$P_J = R_{eq} \cdot \frac{P_2^2}{(n_2 \cdot Kv \cdot f)^2 \cdot B^2} \quad (2.18)$$

Como visto no capítulo referente aos materiais, as perdas magnéticas por volume de material são dadas por:

$$P_v = Cm \cdot f^x \cdot B^y \quad (2.19)$$

Assim, as perdas magnéticas totais para um dado núcleo podem ser expressas pela equação (2.20)

$$P_{mag} = V_e \cdot Cm \cdot f^x \cdot B^y \quad (2.20)$$

Através das equações anteriores pode-se encontrar a relação entre as perdas Joule e as perdas magnéticas, como se segue:

Das equações (2.15), (2.18) e (2.20), tem-se :

$$P_{tot} = \frac{R_{eq} \cdot P_2^2}{(n_2 \cdot Kv \cdot f)^2 \cdot B^2} + V_e \cdot Cm \cdot f^x \cdot B^y \quad (2.21)$$

Fazendo a derivação de P_{tot} em relação a B , conforme equação (2.14), tem-se:

$$-2 \cdot \frac{R_{eq} \cdot P_2^2}{(n_2 \cdot Kv \cdot f)^2 \cdot B_{otimo}^3} + y \cdot V_e \cdot Cm \cdot f^x \cdot B_{otimo}^{y-1} = 0 \quad (2.22)$$

Reescrevendo a expressão (2.22), tem-se:

$$\frac{R_{eq} \cdot P_2^2}{(n_2 \cdot Kv \cdot f \cdot B_{otimo})^2} = \frac{y}{2} \cdot V_e \cdot Cm \cdot f^x \cdot B_{otimo}^y \quad (2.23)$$

Pode-se então determinar a relação ótima entre P_j e P_{mag} para maximizar a potência de saída do transformador:

$$P_j = \frac{y}{2} \cdot P_{mag} \quad (2.24)$$

A partir desta relação tem-se:

$$P_{mag} = \frac{2}{y+2} \cdot P_{tot} = \frac{2}{y+2} \cdot \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (2.25)$$

e,

$$P_j = \frac{y}{y+2} \cdot P_{tot} = \frac{y}{y+2} \cdot \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (2.26)$$

E, finalmente, obtém-se B e J, através das expressões (2.27) e (2.28):

$$B_{otimo} = \left[\frac{2}{y+2} \cdot \left(\frac{\Delta T}{R_{th}} \right) \cdot \frac{1}{C_m \cdot f^x \cdot V_e} \right]^{\frac{1}{y}} \quad (2.27)$$

$$J_{otimo} = \left[\frac{y}{y+2} \cdot \left(\frac{\Delta T}{R_{th}} \right) \cdot \frac{1}{\rho \cdot MLT \cdot k_u \cdot W_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.88)$$

Para elevação de temperatura e frequência estabelecidas, estes valores são calculados para cada núcleo magnético, usando-se as suas características e a resistividade do condutor.

2.2.2 - Fator de utilização da janela do núcleo

O fator de utilização da janela do núcleo magnético define o percentual de área da janela efetivamente utilizado pelo cobre nu do enrolamento. É dado pela relação entre a área ocupada pelo cobre nu e a área da janela do núcleo.

$$Ku = \frac{S_{Cu}}{W_a} \quad (2.29)$$

Este fator, no seu limite, corresponde a 1 (um), ou seja, 100% de ocupação pelo cobre nu, o que seria considerado um aproveitamento ideal do núcleo. Como será visto, o núcleo magnético não pode ser utilizado na prática, com toda a potência para a qual o material de sua composição e o seu formato permitiriam idealmente, pelo fato da janela do núcleo não ter espaço suficiente para acomodar os enrolamentos que seriam necessários.

O fator de utilização é formado por diversos outros fatores que influenciam na sua composição, os quais devem ser muito bem conhecidos pelo projetista, tais como: formato e isolamento do condutor, isolamento entre as camadas ou entre enrolamentos, tipo de bobinagem, área do carretel, possível necessidade de seguir normas internacionais, entre outros. Uma representação possível para este fator é: [15]

$$Ku = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_4 \quad (2.30)$$

onde:

S_1 = fator de isolamento do condutor, definido por: $A_w(\text{nú})/A_w(\text{isol.})$. Esta relação apresenta valores na faixa de 0,6 a 0,95, conforme bitola do condutor. Quanto mais fino o condutor, menor será o valor de S_1 .

S_2 = fator de bobinagem, depende da maneira pela qual os condutores são dispostos na janela do núcleo e o perfil do condutor. Valores típicos deste fator são de 0,5 a 0,7, e não ultrapassam 0,91.

S_3 = define quanto do espaço da janela do núcleo pode efetivamente ser utilizado pelo enrolamento. Este fator depende do carretel utilizado. Valores típicos para núcleos E-E estão na faixa de 0,75 a 0,80.

S_4 = define o quanto de área da janela é utilizada por isolamentos entre camadas de um mesmo enrolamento, ou entre enrolamentos. Assim, este fator depende

do número de camadas de isolamentos e suas espessuras. Em geral, adota-se um fator de redução de 2,5% por camada.[15]

Existe ainda um elemento que não foi considerado nos fatores acima, mas que é contemplado na norma IEC435. Trata-se da “creepage distance”, ou seja, os condutores devem estar a uma distância de, pelo menos, 4mm de cada extremidade da janela do núcleo. Esta norma foi criada para núcleos de transformadores convencionais de baixa frequência, não devendo ser aplicada diretamente no caso de transformadores para alta frequência, de pequenas potências ou pequenos núcleos.

Em resumo, pode-se dizer, de forma geral, que o fator de utilização da janela do núcleo situa-se entre 0,45 (para um projeto otimista) e 0,35 (para um pessimista).

Uma maneira mais precisa e mais realista para determinação deste fator K_u será demonstrada no capítulo referente à implementação computacional.

Além dos parâmetros já analisados, um outro parâmetro importante para definição da metodologia de projeto é a chamada “frequência de transição”.

É conhecido que em projetos clássicos de transformadores para operação em baixas e médias frequências adota-se a densidade de fluxo magnético de saturação como dado. Isto ocorre porque naquela faixa de frequência as perdas magnéticas são irrelevantes, não havendo, por conseguinte, porque preocupar-se com as mesmas.

Entretanto, em alta frequência as mesmas perdas precisam ser consideradas, pois estas tomam proporções importantes, influenciando diretamente na elevação de temperatura, a qual é limitada pelas características do núcleo magnético, como já visto na análise térmica dos materiais magnéticos. Através da escolha de valores de densidade de fluxo adequadas, se faz necessário determinar onde se encontra a

fronteira, em termos de frequência, a partir da qual esta consideração deve ser feita. Fica desta forma definida a “frequência de transição”.

A frequência de transição pode ser determinada através da expressão (2.31), considerando-se as especificações de projeto e do núcleo a ser utilizado.

$$f_T = \left(\frac{2}{2+y} \cdot \frac{\Delta T_H}{R_{th}} \cdot \frac{1}{Ve \cdot Cm \cdot B_S^y} \right)^{\frac{1}{x}} \quad (2.31)$$

A partir do resultado obtido desta equação tem-se o seguinte:

- Se $f < f_t$ o dimensionamento do transformador deverá ser feito considerando o efeito de saturação, pois neste caso $B_{ótimo} > B_S$, e para que não haja saturação do núcleo, deve-se escolher $B = B_S$.

- Se $f > f_t$ o dimensionamento do transformador deverá ser feito pela consideração das perdas. Neste caso $B_{ótimo} < B_S$, devendo-se portanto escolher $B = B_{ótimo}$.

2.3 - Cálculo dos enrolamentos do transformador

Após a determinação dos parâmetros necessários para o cálculo da potência num transformador, e a escolha do núcleo deste, parte-se então para o cálculo de outro elemento importante do transformador, que são os seus enrolamentos.

2.3.1 - Cálculo do número de espiras dos enrolamentos do transformador

A partir da expressão (2.32) pode-se determinar o número de espiras dos enrolamentos. Considerando o enrolamento primário tem-se:

$$n_1 = \frac{V_1}{K_v \cdot A_e \cdot B \cdot f} \quad (2.32)$$

Assim sendo, com B e Kv determinados como anteriormente visto, V_1 e f impostos, e Ae retirada da geometria do núcleo, pode-se obter facilmente o número de espiras necessárias para a criação do fluxo requerido.

O número de espiras nos enrolamentos secundários pode ser calculado através da relação de transformação n_s/n_p , apresentada na expressão (2.33):

$$n_{si} = n_p \cdot \frac{V_{si}}{V_p} \quad ; \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (2.33)$$

2.3.2 - Cálculo da bitola do condutor

O condutor deve ter uma área de secção transversal suficiente para atender as necessidades em termos de densidade de corrente.

Para tanto, tendo-se J (densidade de corrente) calculado no projeto, e I_{ef} (corrente eficaz do enrolamento), determina-se a área da secção transversal do condutor.

$$S_{cond.} = \frac{I_{ef}}{J} \quad (\text{mm}^2) \quad (2.34)$$

$S_{cond.}$ é a área mínima necessária para que não seja ultrapassada a densidade de corrente ótima calculada.

Na determinação da bitola do condutor, além da área mínima há que se levar em conta o efeito pelicular. O efeito pelicular aparece devido a presença de correntes alternadas que geram um campo magnético circular no condutor. Este campo induz correntes parasitas que fazem com que a corrente que fluía em toda a área do condutor passe a fluir somente perto da superfície. Com isso a região central do condutor torna-se uma grande reatância CA, provocando um aumento na resistência CA dos condutores. É importante que seja também considerado o efeito de proximidade, como será visto posteriormente.

Para que o efeito pelicular possa ser considerado desprezível deve-se ter, no caso de condutores cilíndricos [18], uma relação $d/\delta \leq 2$, sendo d o diâmetro do condutor e δ a profundidade de penetração, dada pela expressão (2.36), ou seja, é a casca envoltória por onde circula a corrente que na ausência do efeito pelicular circularia por toda a área do condutor. Quando a relação $d/\delta = 2$, ou ainda $\delta = r$ (profundidade de penetração igual ao raio do condutor), tem-se que a corrente circula por toda a área do condutor.

Assim, o condutor elementar será calculado por:

$$d \leq 2 \cdot \sqrt{\frac{\rho_c}{\pi \cdot \mu_o \cdot \mu_c \cdot f}} \quad [\text{m}] \quad (2.35)$$

Considerando que $\mu_c = 1,0$ (material não-ferromagnético), tem-se:

$$\delta = \frac{C_T}{\sqrt{f}} \quad (2.36)$$

Onde C_T depende da temperatura, já que ρ_c depende desta, como mostrado na equação (2.37):

$$\rho_c = \rho_{20^\circ\text{C}} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 20)] \quad (2.37)$$

onde: $\rho_{20^\circ\text{C}}$ = resistividade do cobre a $20^\circ\text{C} = 1,709 \cdot 10^{-8} \, \Omega \cdot \text{m}$;

ρ = resistividade do cobre na temperatura T considerada ($\Omega \cdot \text{m}$);

α = coeficiente de temperatura do cobre = $0,00393 \, /^\circ\text{C}$;

T = temperatura média nos condutores ($^\circ\text{C}$).

Desta forma, o diâmetro do condutor elementar, considerando o efeito pelicular, será dado por:

$$d \leq 2 \cdot \frac{C_T}{\sqrt{f}} \quad [\text{m}] \quad (2.48)$$

A escolha da bitola do condutor, na prática, deve ser bastante criteriosa. Relações δ/r abaixo de 0,7 começam a provocar sérias perdas por efeito pelicular. Para a relação acima de 1 o efeito pelicular se estabiliza, e o efeito de proximidade diminui cada vez mais. Se o condutor único tem uma relação abaixo de 1 deve-se selecionar múltiplos fios ou usar fio Litz, onde a relação para cada cordão de fios é bem acima do mínimo.

De acordo com Ingram[12], para pulso, onda quadrada, ou dente de serra, utiliza-se nos cálculos do condutor elementar uma frequência pelo menos cinco vezes maior que a frequência de operação, enquanto que para ondas triangulares faz-se necessário uma frequência pelo menos três vezes maior. A frequência exata de operação pode ser usada somente para ondas senoidais.

O efeito de proximidade ocorre da mesma forma que o efeito pelicular, mas ao invés do campo magnético que gera as correntes parasitas ser produzido pela corrente que passa pelo próprio condutor, este é produzido pela corrente que circula em condutores vizinhos.

O cálculo do diâmetro ideal (d_{id}), segundo Jongsma[13], para que se possa minimizar as perdas devidas ao efeito de proximidade pode ser feito para condutores cilíndricos por:

$$d_{id} = \left(\frac{17,1.lb}{n.f} \right)^{1/3} . Cp \quad ; \quad \text{com } f \text{ em kHz} \quad (2.49)$$

Onde n = número total de espiras;

lb = largura do carretel, e;

Cp é o fator de correção que depende do número e da disposição das camadas.

Este fator sofre uma variação de 1 a 1,06, usando-se, para um caso geral, $Cp = 1,03$.

Com o diâmetro ideal encontrado, pode-se calcular o fator de resistência F_R que será utilizado para o cálculo da resistência CA (R_{CA}).[13]

$$F_R = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{d}{d_{id}} \right)^6 \quad (2.50)$$

Para $d = d_{id}$, F_R é igual a 1,5.

$$R_{CA} = F_R \cdot R_{CC} \quad (\Omega/m) \quad (1.37)$$

Onde R_{CC} é a resistência CC dos condutores.

2.4 - Conclusões

As considerações apresentadas neste capítulo acerca dos parâmetros importantes para o projeto do transformador permitem que se faça uma escolha criteriosa dos mesmos, de forma a se ter um projeto adequado.

A partir das equações e parâmetros obtidos nos capítulos 1 e 2, pode-se fazer o projeto completo de um transformador, para qualquer número de enrolamentos, e quaisquer formas de onda aplicadas e tipo de ferrite utilizada.

Nos capítulos seguintes será feita a implementação computacional de um programa capaz de executar o que foi visto anteriormente de uma forma automatizada, inclusive com considerações práticas adicionais sobre alguns outros fatores até aqui não considerados ou considerados idealmente.

CAPÍTULO III - METODOLOGIA DE PROJETO

A metodologia de projeto definida e implementada através de um programa computacional consiste basicamente na seleção correta do núcleo a ser utilizado, para a partir daí fazer-se um projeto adequado do elemento magnético. A escolha do núcleo é feita a partir de especificações elétricas e térmicas do elemento magnético como um todo, associado às características deste núcleo magnético.

A partir de dados fornecidos pelo projetista, tais como: tensões, correntes, frequência de chaveamento, etc..., e de parâmetros armazenados no banco de dados do programa, este é capaz de fazer o projeto completo do transformador.

O projeto começa pela determinação das máximas perdas admitidas, calcula B e J ideais, e então dimensiona os enrolamentos para que se tenha um projeto de acordo com as condições elétricas e térmicas fornecidas pelo projetista.

A implementação computacional da metodologia de projeto foi desenvolvida com o programa Borland Delphi, que combina um meio de programação visual com orientação a objeto, um compilador Pascal e um banco de dados.

O programa desenvolvido neste trabalho é composto basicamente de dois grandes módulos, um deles relacionado ao cálculo e outro relacionado ao banco de dados.

3.1 - Banco de dados

O primeiro banco de dados a ser apresentado é o banco relacionado ao material magnético e, na sequência tem-se o banco de dados dos núcleos. O banco relacionado à forma de onda consiste da tabela (2.1) já apresentada anteriormente.

3.1.1 - Banco de Dados do Material Magnético

Este banco de dados é composto pelo nome do material, fabricante, faixa de frequência de operação, densidade de fluxo de saturação e outros, como apresentado na tabela 3.1.

Os valores relativos a C_m , x e y são obtidos como mostrado no capítulo I, e os demais valores foram obtidos a partir de catálogos dos fabricantes.

Através destes dados pode-se selecionar o melhor material para cada situação, em função de suas características e da faixa de frequência de operação.

Tabela 3.1 - Banco de Dados do Material Magnético

Material	Fabricante	Faixa de Frequência (KHz)	Densidade de Fluxo de Saturação (T)	Temp. Curie (°C)	C_m	x	y
3C80	Philips	10-100	0,50	>200	16,70	1,30	2,50
3C81	Philips	10-100	0,50	>210	7,00	1,40	2,50
3C85A	Philips	20-100	0,50	>200	11,00	1,30	2,50
3C85B	Philips	100-200	0,50	>200	1,50	1,50	2,50
3F3A	Philips	20-300	0,50	>200	0,25	1,60	2,50
3F3B	Philips	300-500	0,50	>200	0,02	1,80	2,50
3F3C	Philips	500-1000	0,45	>200	$3,6 \times 10^{-6}$	2,40	2,25
3F4A	Philips	500-1000	0,45	>220	0,12	1,75	2,90
3F4B	Philips	1000-3000	0,45	>220	11×10^{-9}	2,80	2,40
K	Magnetics	<2000	0,46	>230	0,759	1,57	2,76
R	Magnetics	<1500	0,50	>230	0,393	1,98	2,63
P	Magnetics	<1200	0,50	>230	0,003	2,06	2,71
F	Magnetics	<1300	0,49	>250	0,457	1,62	2,57
IP6	Thornton	<50	0,48	>165	1,05	1,55	2,40
IP10	Thornton	10-100	0,50	>200	1,05	1,51	2,50
IP12	Thornton	20-200	0,51	>210	1,05	1,50	2,44

3.1.2 - Banco de Dados dos Núcleos

Este banco apresenta os núcleos quanto a suas características geométricas. Nele pode-se encontrar dados retirados diretamente de catálogos de fabricantes, bem como dados que foram calculados, como apresentado do capítulo 1.

Na tabela (3.2), são mostrados, a título de exemplo, alguns valores contidos no banco de dados, cabendo ressaltar que os núcleos que compõe o banco completo não são apenas aqueles aqui apresentados.

Tabela 3.2.a - Banco de Dados dos Núcleos

Núcleo	Combinação	Fabricante	A	B	C	D	E	F
E80/38/20	E-E	Philips	80,00	38,10	19,80	28,20	59,10	19,80
E65/32/27	E-E	Philips	64,80	32,50	27,00	21,80	43,40	19,60
E55/28/21	E-E	Philips	55,10	27,50	20,70	19,00	38,10	16,90
E56/24/19	E-E	Philips	56,10	23,60	18,80	14,60	38,10	18,80
E50/27/15	E-E	Philips	50,00	27,20	14,60	18,60	34,10	14,60
E42/21/20	E-E	Philips	42,20	21,00	19,70	15,30	30,10	11,90
EC52	E-E	Philips	52,19	24,20	13,38	15,87	33,02	13,38
EC41	E-E	Philips	40,64	19,50	11,60	13,89	27,50	11,60
EC35	E-E	Philips	34,34	17,20	9,49	12,24	22,70	9,49
E42/20	E-E	Thornton	42,00	21,20	20,00	14,80	29,50	12,20
E65/39	E-E	Thornton	66,50	64,40	39,90	44,00	44,20	19,30
EC35	E-E	Thornton	34,50	17,30	9,50	12,25	22,75	9,50

continuação

Núcleo	Ae	Wa	Ap	le	Ve	MLT	lb	hb
E80/38/20	51,74	0,917	0,474	57,70	2.986,00	44,98	17,20	7,49
E65/32/27	39,45	0,851	0,336	49,00	1.932,10	45,86	10,77	6,66
E55/28/21	41,30	0,547	0,226	39,90	1.647,37	41,88	10,03	5,08
E56/24/19	22,58	0,547	0,124	39,90	900,94	33,88	9,53	5,28
E50/27/15	20,19	0,258	0,052	27,70	559,26	29,10	6,73	4,85
E42/21/20	279,00	6,38	17,80	144,00	40.100,00	94,99	41,45	11,52
EC52	180,00	3,1168	5,61	105,00	18.800,00	72,89	28,29	7,62
EC41	121,00	2,146	2,60	89,30	10.800,00	59,94	24,50	5,78
EC35	84,30	1,61	1,35	77,40	6.530,00	50,03	21,48	4,72
E42/20	240,00	1,57	3,77	97,00	23.300,00	105,00	26,00	7,15
E65/39	798,00	3,70	29,50	147,00	117.300,00	174,00	25,00	16,00
EC35	84,30	1,62	1,35	77,40	6.530,00	50,03	21,48	4,72

Com os bancos de dados mostrados no item anterior, e utilizando-se as expressões matemáticas anteriormente desenvolvidas nos capítulos precedentes, pode-se realizar o projeto completo do transformador.

3.2 - Cálculos efetuados pelo programa

Neste item será apresentada a seqüência dos cálculos efetuados pelo programa, a determinação do fator Ku adotada para esta metodologia, o fluxograma mostrando a seqüência de cálculos e algumas considerações de ordem prática quanto à utilização das expressões matemáticas.

3.2.1 - Seqüência de cálculos efetuados pelo programa

Devido à metodologia utilizada para o projeto se basear na minimização das perdas de energia, os cálculos começam determinando a máxima potência que pode ser dissipada (perdas totais) para que não se tenha uma elevação da temperatura acima da permitida.

Para este primeiro cálculo, o programa computacional recorre aos bancos de dados de núcleos, pois é necessário que se defina através da tela de projeto o núcleo a ser utilizado. Cabe salientar que, em versão posterior do programa, uma função definirá o núcleo e o material a ser utilizado, e em caso deste não estar disponível para a utilização, o usuário poderá optar por outro que esteja disponível em seu estoque. A princípio parece que a escolha do núcleo é uma tarefa complicada, mas no decorrer deste trabalho será mostrado que o programa indica se o núcleo que foi escolhido é grande ou pequeno, podendo assim ter uma noção de qual núcleo escolher para o projeto adequado.

A partir do núcleo definido tem-se o valor da resistência térmica deste, e com a elevação da temperatura desejada, definida através da tela de projeto, tem-se as perdas totais no elemento magnético.

Com as perdas totais determinadas, calcula-se então as parcelas atribuídas às perdas magnéticas e as perdas Joule, dadas pelas expressões (2.25) e (2.26)

Antes das perdas serem calculadas, o programa calcula a potência total dos enrolamentos secundários através da somatória dos produtos $V_k \cdot I_k$, como apresentado na equação (2.1). Estes valores são fornecidos pelo usuário na tela de projeto. Nesta versão do programa, o cálculo da potência não considera o tipo de carga que será utilizada.

A potência no primário é calculada através da soma da potência total dos secundários com as perdas totais.

$$P_1 = P_2 + P_{tot} \quad (3.1)$$

Com isso, tem-se a potência para a qual o transformador deve ser projetado. Esta potência pode ser diferente para outras metodologias de projeto, pois

alguns autores a consideram como sendo a potência total nos secundários e outros como sendo a média aritmética das potências do primário e dos secundários.

O próximo passo executado pelo programa é o cálculo de B e J através das equações (2.27) e (2.28) e dos valores armazenados no banco de dados.

Assim, tem-se os valores para a determinação da potência do transformador para o núcleo escolhido, conforme expressão (2.12), ou seja, $S = K_u \cdot K \cdot f \cdot B \cdot J \cdot A \cdot W$

O valor de K_u para a primeira sequência de cálculos é adotado pelo programa como sendo 1. Os cálculos apresentados são executados automaticamente diversas vezes até que se encontre o valor ideal de K_u , ou seja, valor de K_u imposto pelo programa igual ao valor de K_u real, determinado a partir de dados reais de projeto, como será visto mais adiante.

Tendo-se a potência em que o transformador vai operar, e o valor da potência em que o transformador pode operar, basta verificar se o núcleo selecionado é o adequado para este projeto. Para isto, faz-se a relação (3.2).

$$\text{Fator de escolha} = \frac{S}{P_1} \quad (3.2)$$

Através desta relação pode-se observar se o núcleo escolhido está super ou sub-dimensionado, ou seja, se a relação for maior que 1, o núcleo escolhido é suficiente mas poderia trabalhar com maior potência, não estando otimizado, e se o valor for menor que 1 deve-se escolher outro núcleo, sendo o valor ideal igual a 1.

Num exemplo de projeto que será apresentado posteriormente, poderá ser observado que o valor da relação anterior ao final dos cálculos será sempre maior que 1, e em muitos projetos 2 ou 3 vezes este valor. Isto se dá pelo fato de que o enrolamento necessário para ter-se a potência em que o núcleo pode operar não cabe na janela do mesmo, tendo-se então que diminuir a potência de operação, aumentar as

perdas, ou aumentar o tamanho do núcleo, causando assim uma sub-utilização do mesmo. Na determinação do K_u , que será apresentado posteriormente, poderão ser observados os motivos pelos quais em muitos projetos o enrolamento não está adequado para o tamanho do núcleo.

Cabe ressaltar que diminuir a potência é a última coisa a se fazer, visto que este é um valor obrigatório do projeto, a não ser que o maior núcleo disponível não seja suficiente. Um pequeno aumento no valor das perdas, em alguns casos, poderia resolver o problema, mas deveria ser analisado se isto não causaria uma elevação muito grande da temperatura de forma que inviabilizasse o projeto.

Nesta versão do programa estes resultados são mostrados na tela de projeto para que o projetista possa alterar o núcleo, mas em uma versão posterior isto se fará automaticamente.

A corrente no enrolamento primário é o próximo parâmetro a ser calculado pelo programa. Esta é calculada pela potência e a tensão aplicada sobre este enrolamento.

$$I_1 = \frac{P_1}{V_1} \quad (3.3)$$

Na seqüência dos cálculos feitos pelo programa, tem-se o número de espiras nos enrolamentos primário e secundários. No enrolamento primário é calculado através da equação (2.32), e nos enrolamentos secundários, através da relação n_s/n_p , (equação 2.33).

Para a determinação da bitola dos condutores, diversos cálculos serão feitos, pois estes devem adequar-se aos valores comerciais, bem como às escalas de medidas utilizadas para a sua seleção.

O programa começa então pela determinação do condutor elementar nu em AWG (Americam Wire Gage). Cabe ressaltar que o condutor é calculado em AWG pelo fato de que as bitolas dos condutores são dados em valores discretos e relacionados a esta medida, mas a apresentação dos mesmos valores são dados em metros, centímetros ou milímetros ao quadrado.

$$AWG = -20 \log \left(\frac{\pi \cdot d}{2,54 \cdot 10^{-2}} \right) \quad (3.4)$$

Onde o diâmetro d é dado pela equação (2.35), que faz com que o efeito pelicular seja desprezível. Cabe observar que para o cálculo do condutor elementar, pela equação (2.45), o programa verifica qual a forma de onda aplicada e faz o cálculo considerando uma frequência de 5 vezes a frequência de operação para ondas quadradas ou dente de serra, 3 vezes para triangulares, ou a própria frequência de operação para ondas senoidais [12].

O valor da equação acima não é um número inteiro, devendo-se, portanto, arredondá-lo para o inteiro superior, ficando este valor maior que o calculado. Isto pode ser feito pois quanto maior o valor AWG, menor é a bitola do fio, ficando assim garantida a minimização do efeito pelicular.

Com a bitola do condutor elementar nu encontrada (valor comercial), faz-se o cálculo reverso da equação anterior, agora para determinar o diâmetro real deste condutor.

A partir do diâmetro do condutor nu pode-se encontrar o diâmetro do condutor isolado. Isto será visto mais adiante num item referente à obtenção do fator K_u do enrolamento total.

A seção do cobre necessária nos condutores de cada enrolamento, para que se tenha a densidade de corrente calculada anteriormente é dada por:

$$Scu_k = \frac{I_k}{J} \quad (3.5)$$

A partir desta seção calcula-se o número de condutores em paralelo, dado pela relação entre a seção de cobre necessária e a seção do condutor elementar nu .

$$Npar_k = \frac{Scu_k}{Scond} \quad (3.5)$$

Onde, a seção do condutor elementar nu é calculada a partir do diâmetro encontrado anteriormente.

Neste caso, o resultado da relação também deve ser arredondado para o número inteiro superior. Isto fará com que a densidade de corrente fique um pouco maior do que aquela calculada anteriormente. Em decorrência disto, o valor da densidade de corrente deve ser novamente calculada, tendo-se então a densidade de corrente real.

$$Jreal_k = \frac{I_k}{Scond \cdot Npar_k} \quad (3.6)$$

O programa calcula, na seqüência, a área do agrupamento de condutores em paralelo, a área ocupada pelos enrolamentos e a área ocupada pelos isolamentos. Estes cálculos também serão vistos no item referente ao cálculo do fator Ku .

A densidade de fluxo também é recalculada através da equação 1.5, ou seja,

$$Breal = \frac{V_1}{Kv \cdot f \cdot Ae \cdot n_1}$$

Este valor poderia ser obtido também a partir dos enrolamentos secundários, mas visto que a tensão é imposta pelo enrolamento primário preferiu-se calcular através deste.

Outros dois parâmetros calculados pelo programa são o número de espiras por camada e o número de camadas por enrolamento. Estes valores são muito importantes no momento da montagem do transformador, e são obtidos da seguinte forma:

- número de espiras por camada para o enrolamento k:

$$n_{cam,k} = \frac{lb}{d_{corda}} \quad (3.7)$$

Onde d_{corda} é o diâmetro da corda formado pelo agrupamento de condutores em paralelo.

- número de camadas para o enrolamento k

$$n_{enrol,k} = \frac{n_k}{n_{cam,k}} \quad (3.8)$$

O próximo cálculo a ser feito pelo programa é o das resistências CA e CC.

A resistência CC do enrolamento é obtida através da seguinte equação:

$$R_{cc_k} = \frac{4 \cdot \rho_c \cdot n_k \cdot MLT}{\pi \cdot d_{cond}^2 \cdot Npar_k} \quad (3.8)$$

A resistência CA dos enrolamentos deve levar em conta a influência dos efeitos pelicular e de proximidade. Com a minimização do efeito pelicular, já considerado no cálculo do condutor elementar, basta agora considerar o efeito de proximidade.

O aumento da resistência CA de um condutor, em relação ao seu valor em CC, devido à circulação de uma corrente alternada em condutores vizinhos (efeito de

proximidade) pode ser representada por um fator F_R , que é a relação entre a resistência CA e a resistência CC.

$$F_R = \frac{R_{CA}}{R_{CC}} \quad (3.9)$$

Este fator depende do tipo de condutor (cilíndrico, laminar, litz,...), da disposição dos condutores (torcidos, trançados,...) e do número de camadas dos enrolamentos, sendo calculado pelo programa através das equações (2.49) e (2.50).

A partir deste valor e da resistência CC, pode-se então calcular a resistência CA pela relação mostrada anteriormente.

Com os valores obtidos anteriormente, o programa faz o cálculo das perdas magnéticas reais, das perdas Joule reais, bem como das perdas totais reais, obtendo-se assim a elevação de temperatura real. Estes valores são ditos reais, pois são calculados a partir dos parâmetros que serão levados para a montagem do transformador.

As perdas magnéticas reais são obtidas a partir da equação 1.1, considerando-se o volume do material, ou seja:

$$P_{mag_{real}} = V_e \cdot C_m \cdot f^x \cdot B_{real}^y \quad (3.10)$$

As perdas Joule são dadas por:

$$P_{J_{real}} = \sum_{k=1}^N R_{CA_k} \cdot I_k^2 \quad (3.11)$$

Onde N é o número de enrolamentos.

Assim, as perdas totais reais são a soma das perdas anteriores, e em decorrência desta tem-se a elevação da temperatura real.

$$\Delta T_{real} = P_{tot_{real}} \cdot R_{th} \quad (3.12)$$

Onde R_{th} é a resistência térmica do núcleo escolhido pelo projeto.

O último cálculo feito pelo programa é o do fator Ku_{real} . Após a determinação deste, o programa verifica se Ku estimado no começo do projeto é igual ao Ku real. Se estes forem diferentes, os cálculos serão feitos novamente, agora para um Ku estimado um pouco menor ($Ku_{i+1} = Ku_i - 0,01$). Com a verificação da igualdade entre os dois valores, encerra-se o projeto. No programa tem-se 2 fatores de utilização da janela do núcleo: Ku e Ku' , sendo o primeiro deles a relação entre a área da janela do núcleo e a área de cobre, e o segundo a relação da área da janela do núcleo e a área ocupada por todo o enrolamento, incluindo carretel, isolamento, acomodação, etc.

Um estudo mais detalhado sobre este fator, aplicado ao programa, é apresentado a seguir.

3.2.2 - Determinação do fator Ku no programa computacional

Este item merece uma certa atenção devido ao fato de que, muitas vezes, ao montar o transformador, o projetista se surpreende pelo fato do núcleo não conseguir comportar todo o enrolamento necessário, ou sobrar espaço livre demais.

No presente trabalho, o fator Ku será determinado de uma maneira diferente, mais adequada e adaptada a cada situação, sem deixar de considerar os diversos fatores citados em capítulos precedentes. Para tanto, determinar-se-á Ku através do estudo do isolamento dos condutores, do agrupamento dos condutores em paralelo e da área ocupada pelo carretel, entre outros.

Isto será possível devido ao fato de se estar trabalhando com uma ferramenta de grande potencial, que é um programa computacional, o qual calculará automaticamente o Ku .

3.2.2.1 - Isolamento dos condutores

Considerando-se o fator de isolamento $S_1 = A_w(\text{nú})/A_w(\text{isol.})$, tem-se para o fio 10 AWG (fio mais grosso tabelado) um fator de isolamento de 0,9, e um fator de isolamento de 0,57 para o fio 41 AWG (fio mais fino tabelado). Há, portanto, uma grande diferença entre estes valores, tornando o projeto mais difícil e menos confiável.

Uma opção para eliminar este problema é utilizar no projeto, a bitola do condutor já isolado, mas as tabelas AWG são para condutores sem isolamento. Para que se consiga relacionar estas medidas, há uma equação que fornece o diâmetro do condutor isolado, a partir do diâmetro do condutor nu, e outra equação que fornece o diâmetro do condutor nu a partir do valor AWG. Partindo-se então do valor AWG pode-se obter o diâmetro e a área da secção transversal do condutor isolado. Estas equações são dadas a seguir:

$$Dx = \frac{2,54}{\pi} \cdot 10^{-\frac{AWG}{20}} \quad (3.13)$$

Onde Dx = diâmetro do condutor nu em centímetros.

$$Dx' = Dx + 0,028 \cdot \sqrt{Dx} \quad (3.14)$$

Onde Dx' = diâmetro do condutor isolado em centímetros.

Com a utilização destas equações no programa computacional, consegue-se substituir nos cálculos o fator de isolamento S_1 por um fator mais real e único para cada condutor.

3.2.2.2 - Agrupamento de condutores em paralelo.

Para determinar a área ocupada por um grupo de condutores em paralelo, considera-se que qualquer número de condutores agrupados formam um

encordoamento cilíndrico. Esta afirmação é mais verdadeira se este encordoamento for torcido, como mostra a figura 3.1:

Figura 3.1 - Encordoamento torcido de condutores



O cálculo da área é feito a partir do diâmetro D_t do encordoamento. Este pode ser encontrado a partir de figuras geométricas, tendo sempre como diâmetro base o de um único condutor com isolamento, como é mostrado na figura 3.2:

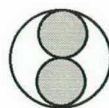
Figura 3.2 - Agrupamento de condutores em paralelo

1 condutor



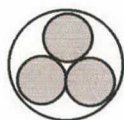
$$D_t = D_x'$$

2 condutores



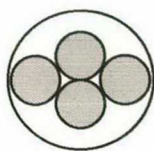
$$D_t = 2 * D_x'$$

3 condutores



$$D_t = 2,156 * D_x'$$

4 condutores



$$D_t = 2,732 * D_x'$$



$$D_t = 2,4142 * D_x'$$

Para os casos em que os condutores possam assumir diversas formas de

agrupamento admite-se o maior diâmetro, como para o caso de 4 condutores, visto anteriormente.

Neste trabalho foram feitos agrupamentos para até 25 condutores, e os resultados são mostrados na tabela 3.3.

TABELA 3.3 - Diâmetro total do encordoamento tendo como base um condutor único com isolamento.

Número de condutores em paralelo	Diâmetro total	Número de condutores em paralelo	Diâmetro total	Número de condutores em paralelo	Diâmetro total
1	Dx'	10	$4 Dx'$	19	$5 Dx'$
2	$2 Dx'$	11	$4,2 Dx'$	20	$5,6 D$
3	$2,156 Dx'$	12	$4,2 Dx'$	21	$5,6 Dx'$
4	$2,732 Dx'$	13	$4,6 Dx'$	22	$5,6 Dx'$
5	$3 Dx'$	14	$4,75 Dx'$	23	$5,6 Dx'$
6	$3 Dx'$	15	$4,8 Dx'$	24	$6 Dx'$
7	$3 Dx'$	16	$4,8 Dx'$	25	$6 Dx'$
8	$3,64 Dx'$	17	$5 Dx'$		
9	$3,822 Dx'$	18	$5 Dx'$		

Dx' = Diâmetro de 1 condutor com isolamento.

Com o objetivo de encontrar um coeficiente que relacione a área de um único condutor com isolamento com a área de um agrupamento de condutores, foram montadas quatro tabelas, para diferentes bitolas de condutores, que serão mostradas a seguir:

TABELA 3.4 - Condutor de diâmetro 0,35mm (28 AWG)

Número de condutores em paralelo	Diâmetro fictício do grupo de condutores isolados (mm)	Soma das áreas dos condutores isolados (mm ²)	Área fictícia do grupo de condutores isolados (mm ²)	Relação entre Área fictícia e Soma das áreas	Soma das áreas * 1,65 (fator da corda) (mm ²)
1	0,35	0,10	0,10	1,00	xx
2	0,70	0,19	0,38	2,00	xx
3	0,75	0,29	0,45	1,55	0,48
4	0,90	0,38	0,64	1,65	0,63
5	0,91	0,48	0,65	1,35	0,79
6	1,05	0,58	0,87	1,50	0,95
7	1,05	0,67	0,87	1,29	1,11
8	1,27	0,77	1,27	1,65	1,27
9	1,34	0,87	1,41	1,62	1,43
10	1,40	0,96	1,54	1,60	1,59
11	1,47	1,06	1,70	1,60	1,75
12	1,47	1,15	1,70	1,47	1,90
13	1,61	1,25	2,04	1,63	2,00
14	1,65	1,35	2,13	1,58	2,16
15	1,68	1,44	2,22	1,54	2,31
16	1,68	1,54	2,22	1,44	2,46
17	1,75	1,64	2,41	1,47	2,62
18	1,75	1,73	2,41	1,39	2,77
19	1,75	1,83	2,41	1,32	2,92
20	1,96	1,92	3,02	1,57	3,08
21	1,96	2,02	3,02	1,49	3,23
22	1,96	2,12	3,02	1,43	3,39
23	1,96	2,21	3,02	1,36	3,54
24	2,10	2,31	3,46	1,50	3,69
25	2,10	2,41	3,46	1,44	3,85

TABELA 3.5 - Condutor de diâmetro 0,48mm (25 AWG)

Bitola do cond. isol 0,48 Num. de cond. //	Diâmetro fictício do grupo de condutores isolados (mm)	Soma das áreas dos condutores isolados (mm ²)	Área fictícia do grupo de condutores isolados (mm ²)	Relação entre Área fictícia e Soma das áreas	Soma das áreas * 1,65 (fator da corda) (mm ²)
1	0,48	0,18	0,18	1,00	xx
2	0,96	0,36	0,72	2,00	xx
3	1,03	0,54	0,84	1,55	0,90
4	1,23	0,72	1,20	1,65	1,19
5	1,25	0,90	1,22	1,35	1,49
6	1,44	1,09	1,63	1,50	1,79
7	1,44	1,27	1,63	1,29	2,09
8	1,75	1,45	2,40	1,65	2,39
9	1,83	1,63	2,64	1,62	2,69
10	1,92	1,81	2,90	1,60	2,99
11	2,02	1,99	3,19	1,60	3,28
12	2,02	2,17	3,19	1,47	3,58
13	2,21	2,35	3,83	1,63	3,76
14	2,26	2,53	4,00	1,58	4,05
15	2,30	2,71	4,17	1,54	4,34
16	2,30	2,90	4,17	1,44	4,63
17	2,40	3,08	4,52	1,47	4,92
18	2,40	3,26	4,52	1,39	5,21
19	2,40	3,44	4,52	1,32	5,50
20	2,69	3,62	5,67	1,57	5,79
21	2,69	3,80	5,67	1,49	6,08
22	2,69	3,98	5,67	1,43	6,37
23	2,69	4,16	5,67	1,36	6,66
24	2,88	4,34	6,51	1,50	6,95
25	2,88	4,52	6,51	1,44	7,24

TABELA 3.6 - Condutor de diâmetro 0,69mm (22 AWG)

Bitola do cond. isol 0,69 Num. de cond. //	Diâmetro fictício do grupo de condutores isolados (mm)	Soma das áreas dos condutores isolados (mm ²)	Área fictícia do grupo de condutores isolados (mm ²)	Relação entre Área fictícia e Soma das áreas	Soma das áreas * 1,65 (fator da corda) (mm ²)
1	0,69	0,37	0,37	1,00	xx
2	1,38	0,75	1,50	2,00	xx
3	1,49	1,12	1,74	1,55	1,85
4	1,77	1,50	2,47	1,65	2,47
5	1,79	1,87	2,53	1,35	3,08
6	2,07	2,24	3,37	1,50	3,70
7	2,07	2,62	3,37	1,29	4,32
8	2,51	2,99	4,95	1,65	4,94
9	2,64	3,37	5,46	1,62	5,55
10	2,76	3,74	5,98	1,60	6,17
11	2,90	4,11	6,60	1,60	6,79
12	2,90	4,49	6,60	1,47	7,40
13	3,17	4,86	7,91	1,63	7,78
14	3,24	5,24	8,26	1,58	8,38
15	3,31	5,61	8,62	1,54	8,97
16	3,31	5,98	8,62	1,44	9,57
17	3,45	6,36	9,35	1,47	10,17
18	3,45	6,73	9,35	1,39	10,77
19	3,45	7,10	9,35	1,32	11,37
20	3,86	7,48	11,73	1,57	11,97
21	3,86	7,85	11,73	1,49	12,56
22	3,86	8,23	11,73	1,43	13,16
23	3,86	8,60	11,73	1,36	13,76
24	4,14	8,97	13,46	1,50	14,36
25	4,14	9,35	13,46	1,44	14,96

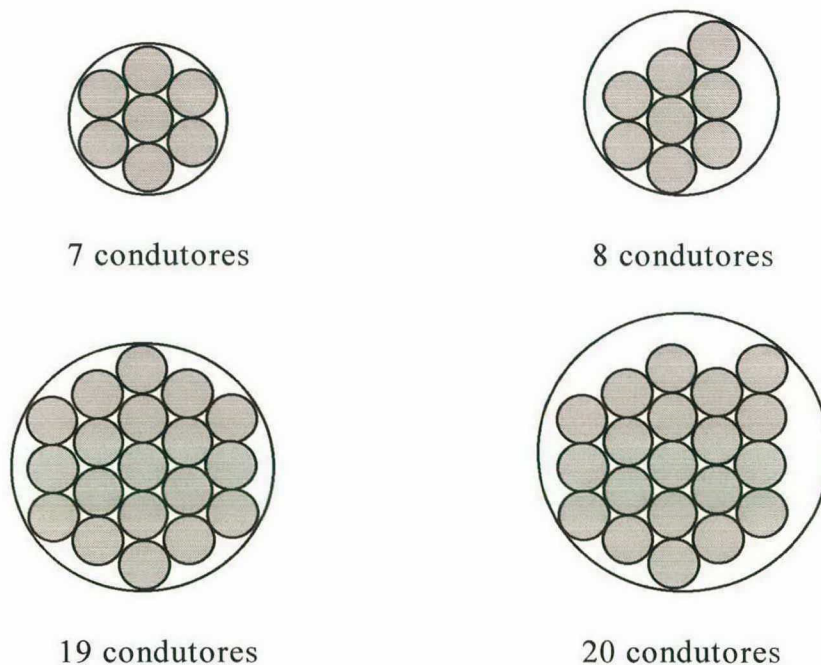
TABELA 3.7 - Condutor de diâmetro 1,07mm (18 AWG)

Bitola do cond. isol 1,07 Num. de cond. //	Diâmetro fictício do grupo de condutores isolados (mm)	Soma das áreas dos condutores isolados (mm ²)	Área fictícia do grupo de condutores isolados (mm ²)	Relação entre Área fictícia e Soma das áreas	Soma das áreas * 1,65 (fator da corda) (mm ²)
1	1,07	0,90	0,90	1,00	xx
2	2,14	1,80	3,60	2,00	xx
3	2,31	2,70	4,18	1,55	4,45
4	2,75	3,60	5,94	1,65	5,93
5	2,78	4,50	6,08	1,35	7,42
6	3,21	5,40	8,09	1,50	8,90
7	3,21	6,29	8,09	1,29	10,39
8	3,89	7,19	11,91	1,65	11,87
9	4,09	8,09	13,14	1,62	13,35
10	4,28	8,99	14,39	1,60	14,84
11	4,49	9,89	15,86	1,60	16,32
12	4,49	10,79	15,86	1,47	17,80
13	4,92	11,69	19,03	1,63	18,70
14	5,03	12,59	19,86	1,58	20,14
15	5,14	13,49	20,72	1,54	21,58
16	5,14	14,39	20,72	1,44	23,02
17	5,35	15,29	22,48	1,47	24,46
18	5,35	16,19	22,48	1,39	25,90
19	5,35	17,08	22,48	1,32	27,34
20	5,99	17,98	28,20	1,57	28,77
21	5,99	18,88	28,20	1,49	30,21
22	5,99	19,78	28,20	1,43	31,65
23	5,99	20,68	28,20	1,36	33,09
24	6,42	21,58	32,37	1,50	34,53
25	6,42	22,48	32,37	1,44	35,97

Nestas tabelas, como pode ser visto, tem-se o número de condutores em paralelo, o diâmetro fictício do agrupamento (obtido da forma mostrada anteriormente), a soma das áreas dos condutores isolados (A_{total} = área de 1 condutor com isolamento x número de condutores), a área fictícia do agrupamento de condutores (obtida a partir do diâmetro fictício), e tem-se também a relação entre a área fictícia e a soma das áreas.

Como foi dito anteriormente, estas tabelas foram montadas com objetivo de obter-se um coeficiente que relacionasse a área de um único condutor isolado com a área do encordoamento. A partir das relações encontradas nas tabelas anteriores observa-se que fica difícil obter este coeficiente pelo fato de que as relações são diferentes e não seguem uma tendência especial. Apesar disso, elas estão situadas dentro de uma determinada faixa, cujo limite superior é 1,65 e o inferior é 1,29. Esta diferença pode ser melhor entendida ao se observar as figuras abaixo, que mostram o melhor e o pior agrupamento dos condutores.

FIGURA 3.3 - Melhores e piores casos de agrupamentos

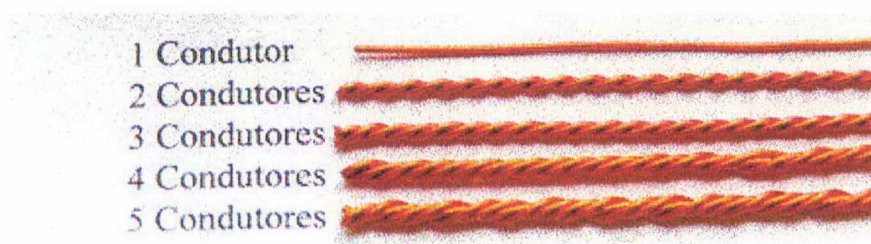


Nestas figuras pode-se constatar um grande desperdício de espaço para o caso de 8 e 20 condutores, ou seja, não há uma boa acomodação. Enquanto para o caso de 19 condutores tem-se uma boa acomodação, para o de 7 condutores tem-se a melhor acomodação possível. Isto pode ser observado também nas relações entre as somas das áreas dos condutores com isolamento e área fictícia, onde quanto maior o resultado da relação pior é a acomodação.

Na última coluna das tabelas tem-se a soma das áreas dos condutores multiplicada por 1,65. Pode-se observar que estes resultados estão próximos aos valores obtidos quando calcula-se a área a partir do diâmetro fictício, mesmo para os agrupamentos onde a relação não é de 1,65.

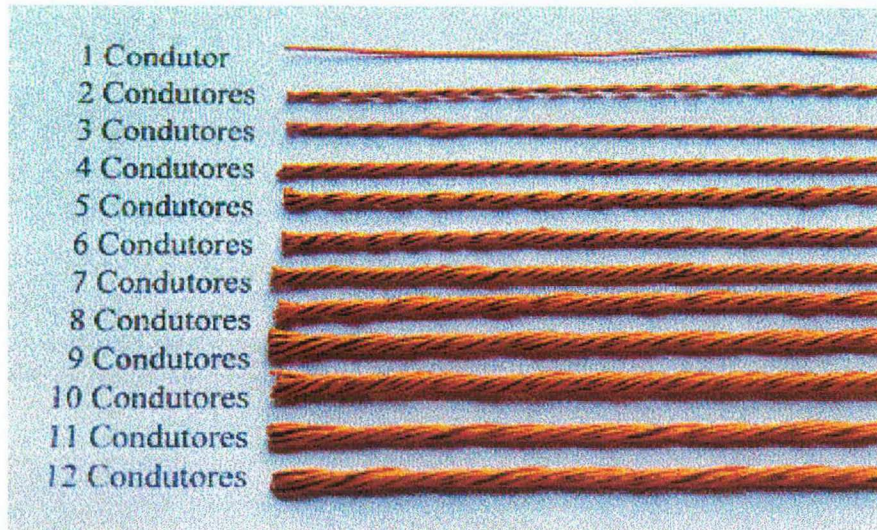
Para verificar se o coeficiente encontrado está de acordo com a realidade, montou-se uma série de encordoamentos de 1 a 12 condutores em paralelo para 4 bitolas diferentes de condutores, como pode ser visto nas figuras 3.4 e 3.5.

FIGURA 3.4 - Condutor de diâmetro 1,07mm (18 AWG) com 1 a 5 condutores em paralelo



Para o caso do condutor 18 AWG foram feitos encordoamentos com no máximo 5 condutores, pelo fato de tornarem-se encordoamentos excessivamente grossos.

FIGURA 3.5 - Condutor de diâmetro 0,69mm (22 AWG) com 1 a 12 condutores em paralelo



Os condutores foram escolhidos de acordo com a frequência em que podem trabalhar para uma forma de onda senoidal, sem que haja perdas por efeito pelicular. São eles:

Condutor de diâmetro 1,07mm ou 18 AWG (para aplicação em 20 KHz);

Condutor de diâmetro 0,69mm ou 22 AWG (para 50 KHz);

Condutor de diâmetro 0,48mm ou 25 AWG (para 100 KHz) e;

Condutor de diâmetro 0,35mm ou 28 AWG (para 200 KHz).

Montou-se então encordoamentos torcidos de aproximadamente 20 cm, como visto nas figuras 3.4 e 3.5. Nestes encordoamentos fez-se 5 medidas com um paquímetro ao longo de seu comprimento. A média aritmética dos diâmetros medidos, bem como as áreas obtidas a partir destes diâmetros, são mostradas na tabela 3.8:

TABELA 3.8 - Dados obtidos experimentalmente

	fio 28 AWG		fio 25 AWG		fio 22 AWG		fio 18 AWG	
Número de condutores	Diâmetro medido (mm)	Área (mm ²)	Diâmetro medido (mm)	Área (mm ²)	Diâmetro medido (mm)	Área (mm ²)	Diâmetro medido (mm)	Área (mm ²)
1	0,35	0,10	0,48	0,18	0,70	0,38	1,05	0,87
2	0,72	0,41	1,00	0,79	1,45	1,65	2,13	3,56
3	0,79	0,49	1,08	0,92	1,49	1,74	2,29	4,12
4	0,92	0,66	1,22	1,17	1,60	2,01	2,70	5,73
5	0,97	0,74	1,40	1,54	1,82	2,60	3,30	8,55
6	1,10	0,95	1,52	1,81	2,12	3,53		
7	1,10	0,95	1,62	2,06	2,20	3,80		
8	1,23	1,19	1,72	2,32	2,50	4,91		
9	1,29	1,31	1,86	2,72	2,67	5,60		
10	1,38	1,50	1,89	2,81	2,80	6,16		
11	1,43	1,61	1,98	3,08	2,88	6,51		
12	1,45	1,65	1,98	3,08	2,89	6,56		

Comparando-se os valores obtidos teoricamente (através dos desenhos) e experimentalmente (através das medidas), pode-se constatar que o coeficiente encontrado de 1,65 pode ser utilizado para o projeto do enrolamento. Este coeficiente, aplicado ao programa computacional, substitui nos cálculos mais um dos fatores que compõe K_u , tornando-o mais real e preciso. É importante observar que não foi encontrado na literatura pesquisada, nenhum autor que se preocupasse com este fator. Alguns consideram apenas o fator de acomodação, supondo que o enrolamento seja composto por apenas 1 condutor. Em outros casos ainda, nem o fator de acomodação é considerado.

3.2.2.3 - Área ocupada pelo carretel

O percentual de área da janela do núcleo magnético ocupado pelo carretel é mais um dos fatores que compõem o K_u .

A área efetiva disponível para a colocação do enrolamento no núcleo magnético depende do carretel associado a este enrolamento. Cada núcleo (exceto os toroidais) possui o seu carretel correspondente, encontrado nos catálogos dos fabricantes de núcleos, que são em geral os fornecedores também destes carretéis.

Através dos parâmetros do carretel fornecidos pelos fabricantes, pode-se calcular a área efetiva disponível para colocação do enrolamento.

Conforme definido no item 1.3.5 e na figura 1.11, tem-se:

Área disponível para colocação dos enrolamentos = $l_b \times h_b$

Tomando-se como exemplo o núcleo EC-35 da Philips, tem-se, para o seu correspondente carretel:

$$l_b = 21,48 \text{ mm}$$

$$h_b = 4,72 \text{ mm}$$

Ou seja, uma área disponível para o enrolamento de $1,015 \text{ cm}^2$, e não de $1,616 \text{ cm}^2$, que seria a área da janela do núcleo. Isto representa que o carretel provoca uma redução de 37,19% na área que pode ser utilizada pelo enrolamento.

Seguindo o mesmo procedimento anterior tem-se para o núcleo EC-70 da Philips uma área disponível para o enrolamento de $4,77 \text{ cm}^2$, enquanto que a área da janela do núcleo é de $6,38 \text{ cm}^2$, o que representa uma redução de 25,23 %.

Portanto, de acordo com os resultados acima, caso se utilize um fator de redução único, como é feito em alguns projetos, haverá problemas de ocupação na área da janela. Estes problemas podem ser por não se conseguir colocar a quantidade suficiente de condutores, ou por sobrar uma área sem ocupação, ambos resultando num projeto não otimizado.

No programa computacional em desenvolvimento, para cada par núcleo/carretel é calculada a área disponível, sendo esta utilizada nos cálculos.

Elimina-se assim dos cálculos o fator de redução único devido à colocação do carretel, colocando em seu lugar o fator correto para cada situação.

3.2.2.4 - Isolamento entre camadas

O fator S_4 , dado por McLyman [13], define o quanto da janela utilizável para o enrolamento será ocupada por isolamentos entre camadas de um mesmo enrolamento ou entre enrolamentos distintos. O valor de S_4 depende do número de camadas de isolamento e das suas espessuras. Em geral adota-se um fator de redução de 2,5% por camada.

No presente trabalho, será utilizado, a princípio, o mesmo fator de redução, pois ainda não foram realizados estudos que definissem o melhor isolamento a se utilizar, ou a espessura necessária do isolamento.

Este fator de redução é utilizado internamente pelo programa, onde é verificado o número de enrolamentos e calculada a área ocupada pelo isolamento, sem que o usuário se preocupe em fornecê-lo.

Nesta etapa do trabalho não será considerado o fator de redução encontrado na norma IEC435, citada anteriormente. Esta destina-se a transformadores de baixa frequência e, se aplicada aos transformadores em estudo, inviabilizaria o projeto em muitos casos. Como exemplo pode-se citar o núcleo EC-42810 da Magnetics, no qual haveria pelo uso da norma, uma redução de 93,6% da área disponível para o enrolamento.[8]

Após estes estudos pode-se eliminar, indiretamente, o fator K_u como um dado necessário para o projeto.

Devido à metodologia de projeto utilizado, é necessário que se tenha um valor preliminar do fator K_u e este é utilizado como 1 (valor máximo, 100% de utilização da janela do núcleo). Após algumas repetições de cálculos envolvendo os fatores anteriores, bem como cálculos do próprio projeto do transformador, chega-se ao valor real de K_u .

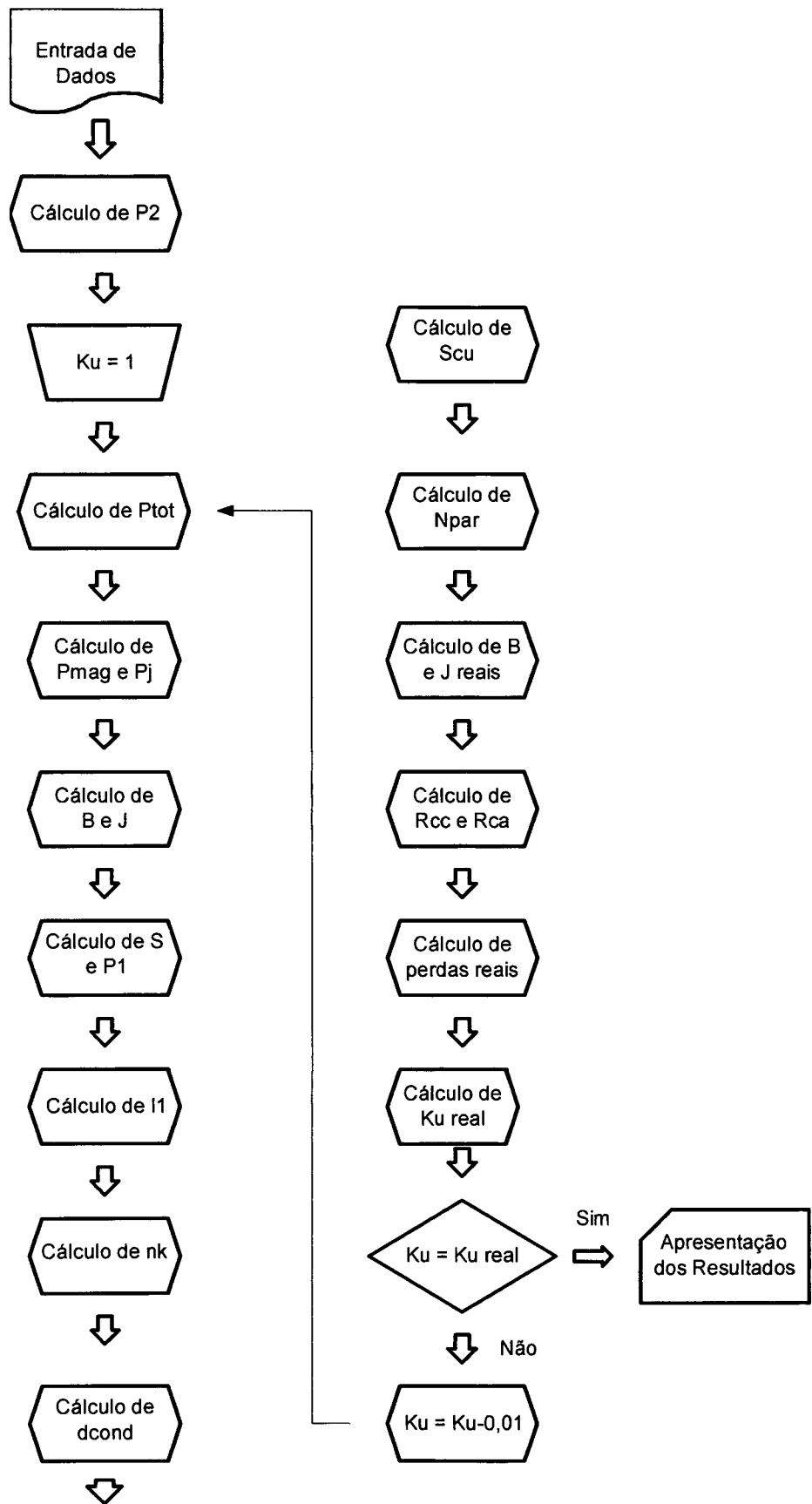
O fator K_u é dado como resposta de duas formas: uma é o valor real de K_u , ou seja, a relação entre a área ocupada pelo cobre nú e a área da janela do núcleo magnético; a outra forma é o fator que relaciona a área ocupada pelo enrolamento, incluindo todos os fatores e a área do carretel disponível para o enrolamento. Nesta última forma de apresentação do fator K_u o valor ideal é 1, não podendo ser ultrapassado. Caso isto ocorra deve-se usar um núcleo maior, ou diminuir a potência como já mencionado anteriormente.

3.3 - Fluxograma

Apresenta-se, na figura 3.6, o fluxograma do programa computacional implementado.

Para este fluxograma, o bloco “entrada de dados” consiste na colocação dos dados necessários para o projetos, tais como tensões, correntes e frequência, além da seleção dos outros parâmetros necessários, como núcleo, material, forma de onda e tipo de condutor.

FIGURA 3.6 - Seqüência de cálculos feita pelo programa.



3.4 - Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a metodologia de projeto implementada para o presente trabalho.

A metodologia de projeto consiste de uma sequência de cálculos feitos via computador associado a um banco de dados composto de diversos materiais e suas características.

Também, neste capítulo, foi apresentado uma nova forma de se determinar K_u , a qual considera o isolamento dos condutores, o isolamento entre enrolamentos, o carretel, bem como a acomodação dos condutores, resultando num valor de K_u mais adequada a cada situação.

CAPÍTULO IV - EXEMPLO DE PROJETO

Neste capítulo apresenta-se um exemplo completo do projeto de transformador, utilizado num inversor.

Este exemplo poderá ser utilizado como roteiro, no momento de um outro projeto, por demonstrar a forma de trabalhar com o programa e escolher os materiais, bem como os cuidados a serem tomados para se ter um projeto adequado.

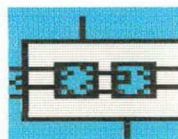
4.1 Exemplo de projeto

4.1.1 - Passo 1: Execução do programa

O programa para dimensionamento de elementos magnéticos é denominado de DEMag, e é por este nome que deve ser procurado. Uma observação importante é que o programa, a princípio, deverá ser instalado na unidade de disco C, num diretório próprio, onde também deverão ser instaladas as suas bibliotecas.

O programa também dispõe de um ícone que poderá ser instalado, caso seja de interesse, sendo este mostrado na figura 4.1.

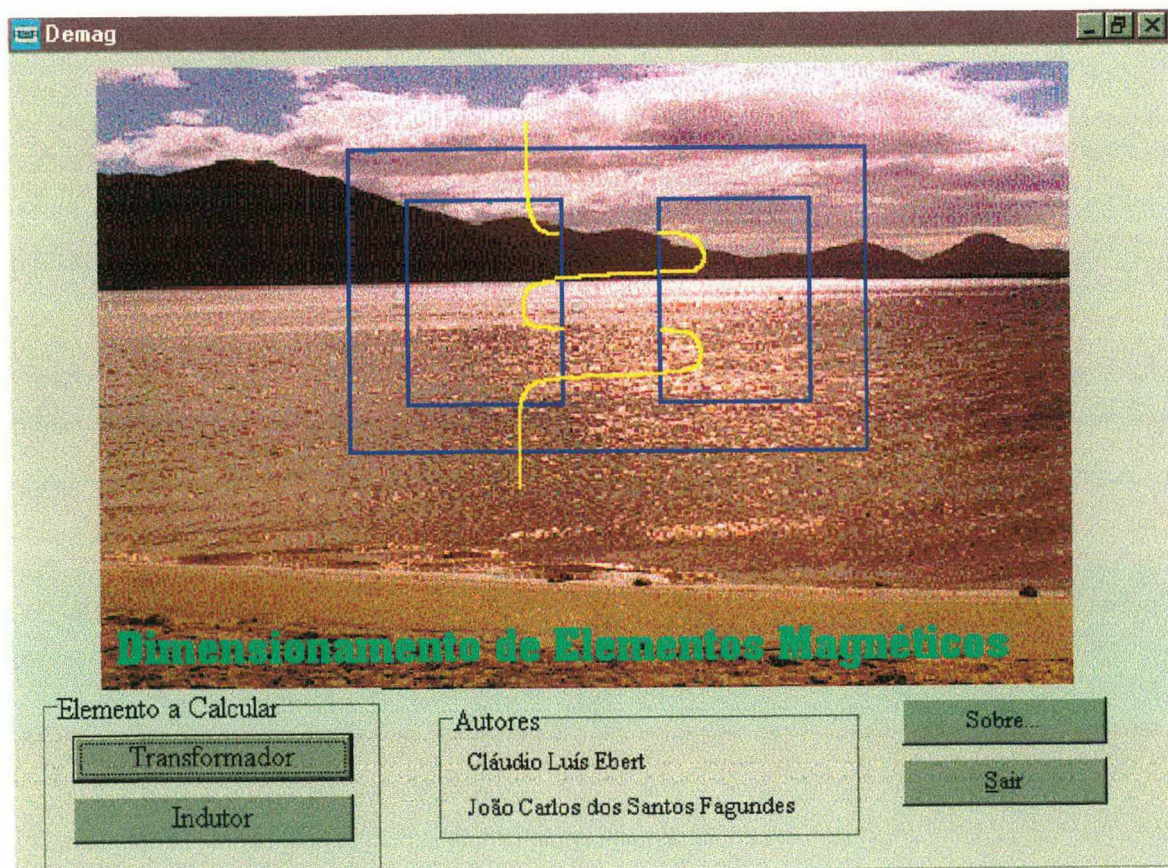
FIGURA 4.1 - Ícone do programa DEMag



DEMAG

Após encontrado o programa, basta executá-lo. A primeira tela a ser vista é uma tela de apresentação, contendo o nome do programa, autores, e botões para a seleção do que se deseja calcular. Esta tela é apresentada na figura 4.2.

FIGURA 4.2 - Tela de apresentação do programa



Pode-se, através desta tela, selecionar o que se deseja calcular (transformador ou indutor), ver informações sobre o programa, ou sair deste. Além disso, pode-se obter também informações sobre os autores, tais como: universidade de trabalho, endereço eletrônico, o que desenvolve, etc. Para isso basta pressionar o botão do mouse sobre o nome do autor desejado.

4.1.2 - Passo 2 - Seleção do que se deseja calcular

Como já foi visto, para selecionar o que se deseja calcular, basta pressionar sobre o botão correspondente, e então uma nova tela se abrirá. No caso deste exemplo o elemento selecionado foi o transformador.

A tela de projeto do transformador é apresentada na figura 4.3.

FIGURA 4.3 - Tela de projeto do transformador

Transformador

Arquivo Núcleo Enrolamento Isolamento Fabricantes Simulador Ajuda

Projeto do Transformador

Núcleo: E42/20 3 Thornton

Elevação de Temperatura (C): Frequência (KHz): 50

Valor Estimado: 20 Valor Real: 19,51

Máxima densidade de Fluxo (T): Máximo 0,075 Real 0,07

Máxima densidade de corrente (A/mm²): 3,07 Ver abaixo

Perdas Magnéticas Totais (W): 0,939 0,795

Perdas Joule Totais (W): 1,13 1,22

Perdas de Totais (Pmag + PJ) [W]: 2,07 2,02

Enrolamento Primário Enrolamentos Secundários

	Sec. 1	Sec. 2	Sec. 3	Sec. 4	Sec. 5
Tensão (Vrms): 50	24	24	12	12	5
Corrente (Arms) 6,381	5	5	3	3	1
Número de espiras no enrolamento: 15	8	8	5	5	2
Número de condutores em paralelo: 26	21	21	13	13	5
Densidade de Corrente [A/mm ²]: 3,02	2,93	2,93	2,84	2,84	2,46
Potência no Primário [VA] 319,1	Potência no Secundário (VA) 317				
Rendimento: 99,35 %					
Área do condutor nu (mm ²): 0,0814	AWG: 28	Ku enrolamento: 0,9798			< 1

Fator de Escolha: 2,067
Can use a small core

Calcular

INEP

Conversor Forma de Onda Condutor Material Magnético Imprimir

Forward Quadrada Simétrica Cilíndrico de Cobre IP6 Fechar

Na tela de projeto temos campos para a colocação de dados, campos de respostas, botões para acionar outras telas, botão de comando para cálculo, e botões para impressão e encerramento do programa.

Os campos para colocação dos dados são:

- Frequência: onde coloca-se a frequência, em kHz, do sinal que será aplicado ao transformador. No caso deste exemplo a frequência é de 50kHz.

- Elevação da temperatura: onde coloca-se a elevação da temperatura, ou seja, a diferença entre a temperatura máxima admissível no ponto mais quente e a temperatura ambiente.

Como foi visto anteriormente neste trabalho, para um projeto ótimo tem-se uma temperatura adequada para cada material, com a qual ele apresenta as menores perdas relativas, podendo estas servir como base para o cálculo. Em versões posteriores do programa estes valores serão adotados automaticamente.

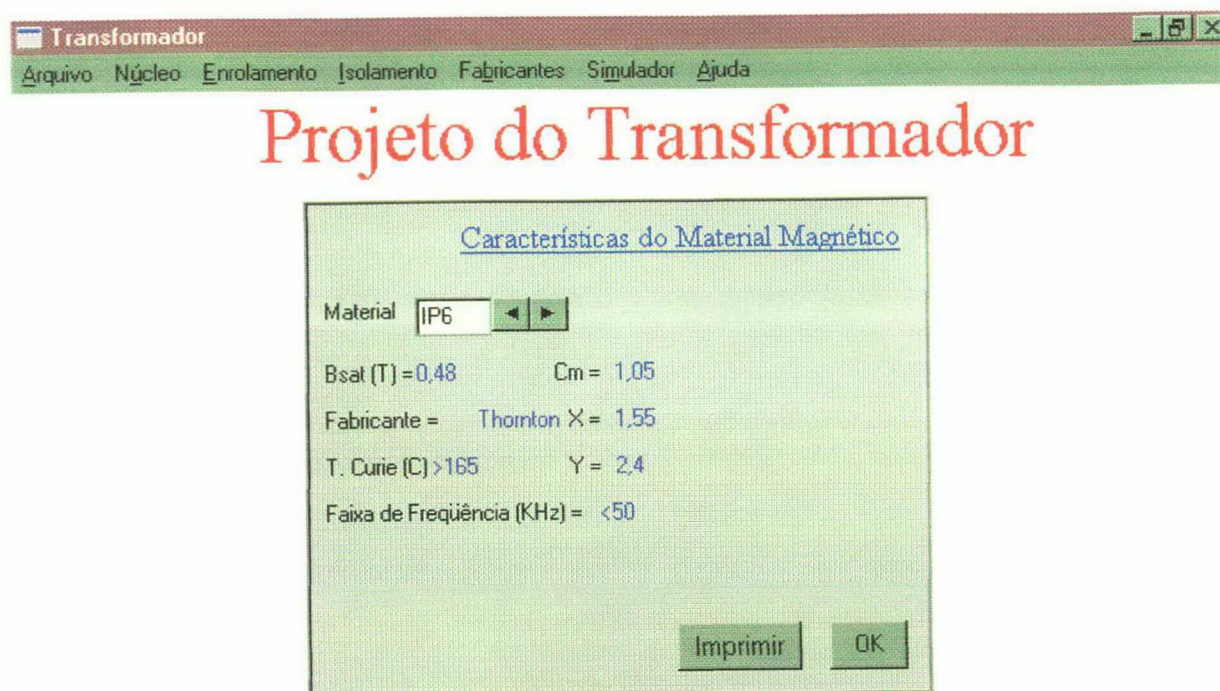
- Tensão no primário do transformador: é a tensão eficaz sobre o enrolamento primário.

- Tensões e correntes nos secundários: como no caso do primário, refere-se a valores eficazes. Para esta versão do programa, podem ser feitos projetos com até 5 enrolamentos secundários. Caso o número de enrolamentos seja menor, os espaços restantes devem ser deixados em branco, ou preenchidos com o valor zero.

4.1.3 - Passo 3 - Escolha do material magnético

Para a escolha do material magnético, o botão “Material Magnético” deve ser pressionado, e então uma nova tela aparecerá, como é mostrado na figura 4.4.

FIGURA 4.4 - Tela para a escolha do material magnético



O material pode ser selecionado através das setas ao lado do campo do material. Abaixo deste campo tem-se as características do material selecionado. Até o presente momento a biblioteca é composta por materiais de 3 fabricantes: Thornton (nacional), Philips e Magnetics.

Para a escolha do material devem ser observados, principalmente, a frequência na qual ele pode operar e a disponibilidade deste em seu local de trabalho.

Para este exemplo, o material selecionado foi o IP6 da Thornton, já que a frequência de operação adotada é de 50 kHz, o que também possibilitaria a utilização de outro material que operasse em frequências maiores.

Após a escolha do material deve-se pressionar o botão OK. O programa retorna, então, para a tela principal, onde um novo elemento deve ser selecionado. Pode-se observar que, no campo abaixo do botão correspondente, o material

escolhido está visível, justamente para que o usuário não necessite visitar a tela dos materiais para saber qual deles está sendo utilizado no projeto.

4.1.4 - Passo 4 - Escolha do condutor

Nesta etapa, deve ser pressionado o botão “Condutor”.

FIGURA 4.5 - Tela para seleção dos condutores

Transformador

Arquivo Núcleo Enrolamento Isolamento Fabricantes Simulador Ajuda

Projeto do Transformador

Condutor

Forma e material do condutor Cilíndrico de Cobre ◀ ▶

Isolamento do condutor

Forma de enrolamento

Isolamento entre camadas

Normas Internacionais

Resistividade do condutor a 20 C ($\Omega \cdot \text{m}$) = $1,709\text{E-}8$

Temperatura nos enrolamentos (C) 50

Resistividade a temp. T ($\Omega \cdot \text{m}$) = $1,91\text{E-}8$

Bitola AWG: 28 Condutor nu (mm^2) = 0,0814

Condutor isolado (mm^2) = 0,1087

Área total do enrolamento (cm^2) = 1,8225

Enrolamento	Resistências ($\Omega \cdot \text{m}$)		Número de Camadas	Número de cond./camada
	Rcc	Rca		
Primário	0,0141	0,0141	2	10
Sec. 1	0,00956	0,00956	1	11
Sec. 2	0,00956	0,00956	1	11
Sec. 3	0,00867	0,00867	1	15
Sec. 4	0,00867	0,00867	1	15
Sec. 5	0,0123	0,0123	1	24

Fator de utilização da janela (Ku)

Enrolamento 0,9798 Cobre 0,3763

Imprimir
OK

Na tela acima, além da escolha do material, encontram-se diversas outras informações sobre os enrolamentos. Uma delas é o condutor a ser utilizado, que pode ser cilíndrico, retangular, laminar ou litz, e que, quanto ao material, podem ser de cobre ou alumínio. No momento o único condutor disponível para utilização é o condutor de cobre cilíndrico.

Além da escolha do material, deve-se colocar nesta tela a temperatura nos enrolamentos, podendo esta ser a soma da temperatura ambiente com a elevação da temperatura.

Outra informação importante, contida nesta tela, é o fator de utilização da janela do núcleo, apresentado de duas formas: fator de utilização do enrolamento, que considera o enrolamento todo (quantidade de cobre, isolamento do condutor, área ocupada pelo carretel, acomodação, isolamento entre camadas, etc); e fator de utilização do cobre, no qual é considerado apenas o percentual de cobre contido na janela do núcleo.

O valor ótimo para o fator de utilização do enrolamento é 1, mas para garantir uma pequena folga entre o enrolamento e a perna lateral do núcleo deve-se adotar um valor entre 0,95 e 0,97. Uma observação importante é que este valor não é imposto, mas calculado pelo programa. Para se conseguir o valor citado anteriormente, deve-se trabalhar com a escolha do núcleo, elevação da temperatura, potência, entre outros.

Numa versão posterior estes ajustes serão feitos automaticamente, o que ainda não é possível, na atual versão.

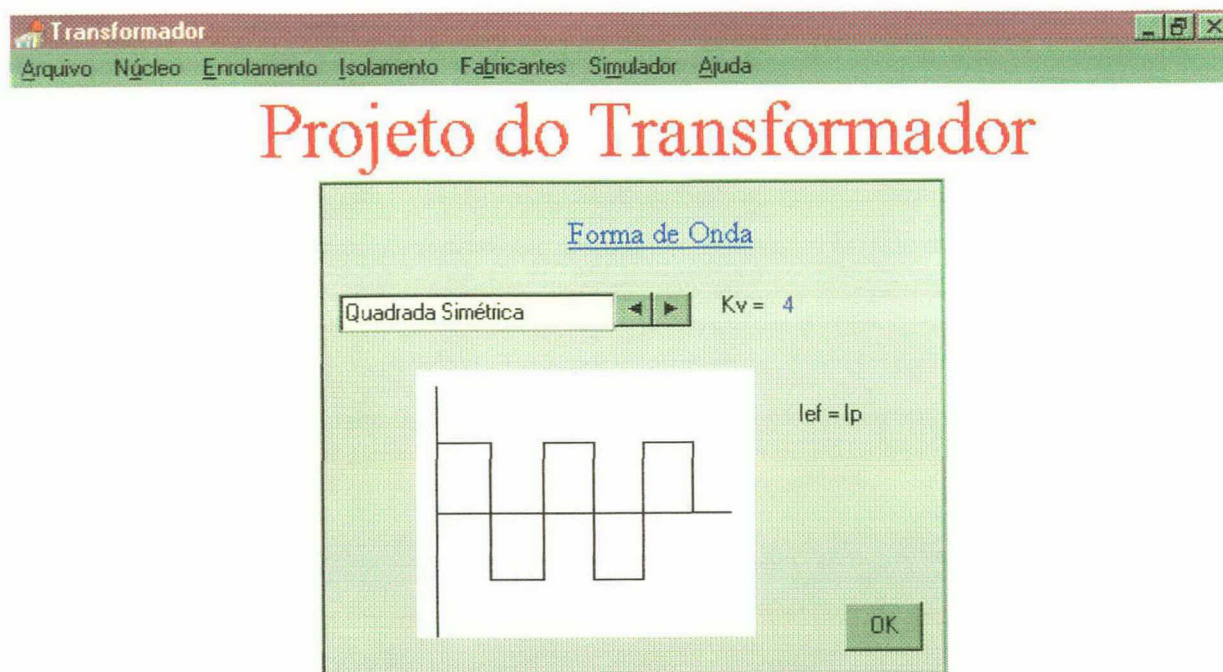
As outras informações contidas nesta tela dizem respeito à bitola do condutor calculado, resistência CC e CA dos enrolamentos, etc.

A exemplo da escolha do material, após o término da seleção do condutor deve-se pressionar OK e retornar à tela principal.

4.1.5 - Passo 5 - Seleção da forma de onda

Para a seleção da forma de onda a ser utilizada, basta pressionar o botão “Forma de Onda” e a tela correspondente aparecerá.

FIGURA 4.6 - Tela para a seleção da forma de onda



Ao selecionar a forma de onda, além de aparecer o nome desta ao lado das setas de seleção, aparece também o desenho, o valor do fator de forma de onda (K_v) e o valor eficaz da corrente, este último baseado no valor de pico.

Para o exemplo em questão, selecionou-se uma forma de onda quadrada simétrica.

4.1.6 - Passo 6 - Escolha do conversor a ser utilizado (nesta versão este passo pode ser omitido)

É importante a escolha do conversor a ser utilizado, pois é através desta que o programa seleciona as equações a serem utilizadas, assim como o que deve aparecer na tela principal.

Numa versão posterior, a escolha do conversor e a escolha da forma de onda estarão em uma única tela, visto que a forma de onda depende do conversor utilizado.

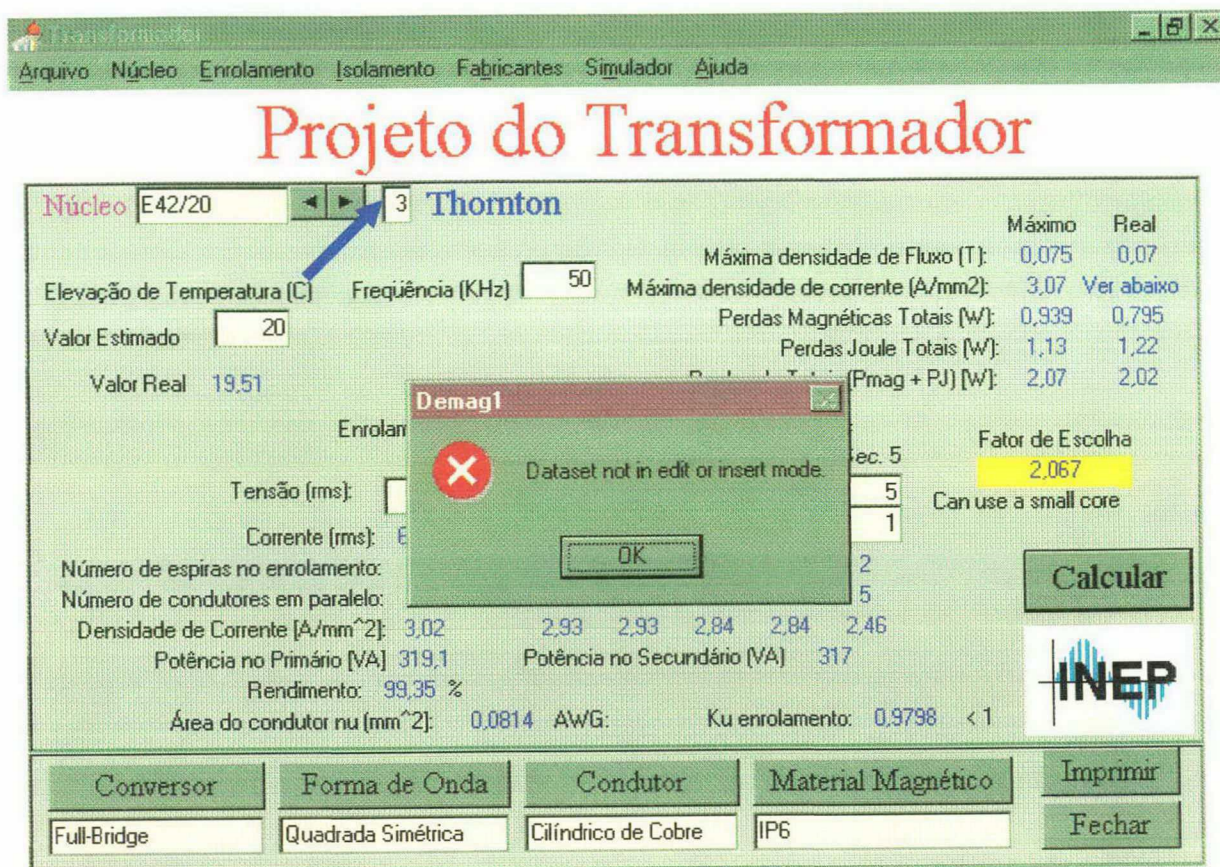
4.1.7 - Passo 7 - Calcular o transformador

Voltando à tela principal não há mais dados a serem preenchidos para que o transformador seja calculado. Pressiona-se então o botão “Calcular”, e após alguns segundos aparecem os resultados na tela, como mostrado anteriormente na tela de projeto.

Caso deseje-se levar estes resultados para a montagem do transformador, basta imprimi-los, através do botão “Imprimir”. Na impressão, o fundo da tela de projeto será branca, e não como mostrada neste exemplo.

É possível que, no momento de calcular o transformador, apareça uma mensagem de erro devido ao fato da seleção do núcleo ainda ser manual. Para corrigir este erro, basta pressionar o botão OK da mensagem, selecionar o número do fabricante (indicado com uma seta na tela a seguir), apagá-lo e colocá-lo novamente.

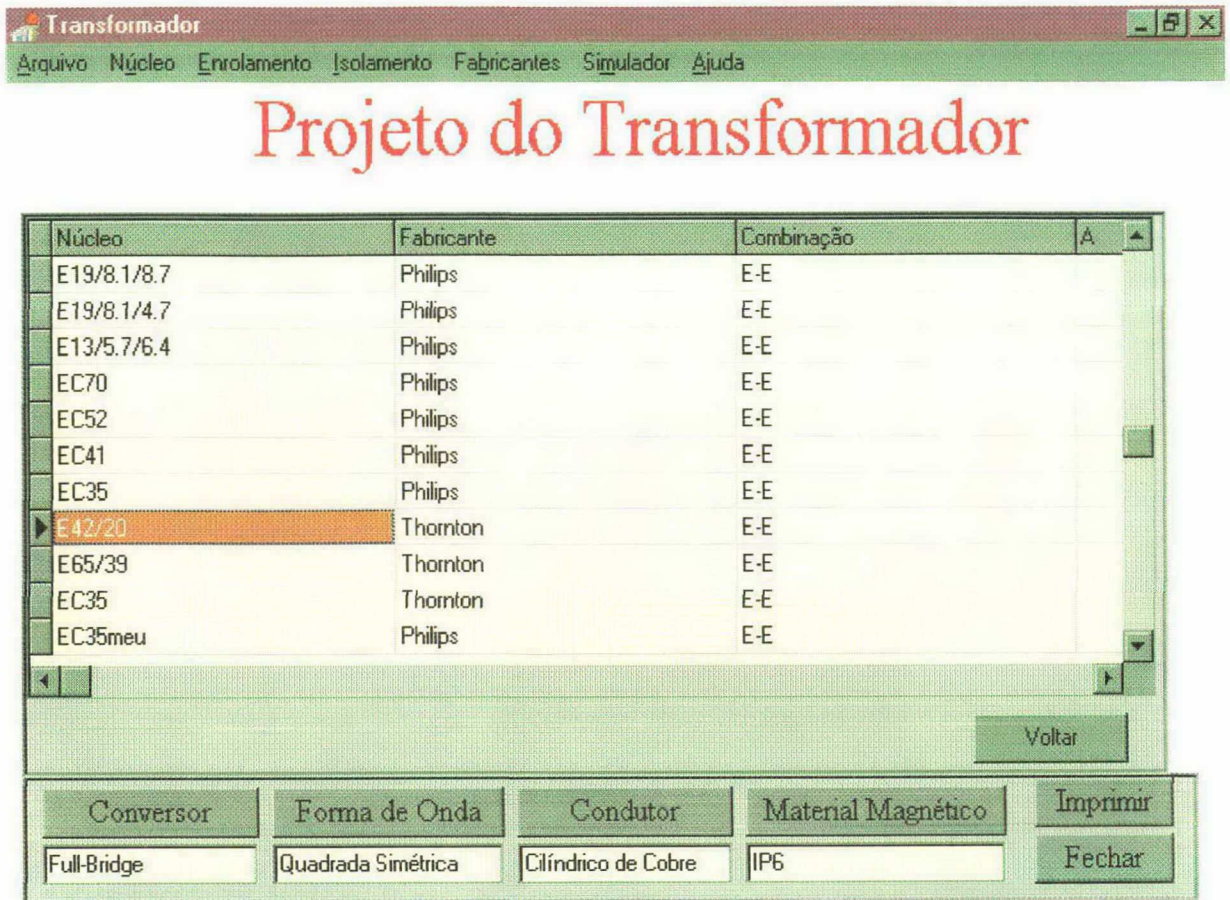
FIGURA 4.7 - Mensagem de erro



4. 2 - Visita à biblioteca de núcleos

Caso o usuário deseje visitar a biblioteca de núcleos, deve pressionar o botão do mouse sobre a palavra “Núcleo”, que está em outra cor, e será aberta uma janela com esta biblioteca.

FIGURA 4.8 - Biblioteca de Núcleos



Através da tela acima pode-se também fazer a escolha do núcleo, caso o usuário queira, por exemplo, um núcleo cujo A_p seja de 3,77. Para isto, basta ir na coluna do A_p e pressionar sobre o valor 3,77 e voltar à tela principal. No campo do núcleo aparecerá, então, o núcleo correspondente a este valor.

Um cuidado importante que se deve ter é com relação à alteração dos dados da biblioteca, já que esta não é protegida, o que possibilita o acréscimo ou a retirada de núcleos.

4.3 - Conclusões

Como apresentado neste capítulo, o programa computacional, exige do projetista apenas os dados essenciais para o projeto do transformador, visto que muitas das informações necessárias estão contidas nos bancos de dados.

Seguindo-se os passos apresentados no exemplo de utilização do programa, pode-se fazer o projeto de um transformador com muita facilidade e rapidez, além de possibilitar o teste de vários tipos de núcleos e/ou materiais.

CAPÍTULO V - ENSAIOS PARA VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos de ensaios feitos para verificação do projeto de transformadores, implementados via programa computacional.

Os ensaios tinham como objetivos verificar o funcionamento do elemento magnético em operação, bem como avaliar o projeto no que diz respeito à acomodação dos enrolamentos no núcleo magnético.

5.1 - Resultados Experimentais para verificação da metodologia empregada no cálculo do fator de utilização da janela do núcleo

Para verificar a validade dos resultados obtidos com a metodologia de projeto empregada, foram feitos 4 projetos de transformadores para diferentes potências. Estes transformadores foram projetados para aplicação em um inversor ponte completa, mostrado na figura 5.2, aproveitando o máximo de potência que o transformador pudesse transferir com uma temperatura no ponto mais quente de 80°C, temperatura para mínimas perdas do material 3C80 (tabela 1.3).

Os principais dados de entrada, bem como os principais resultados são mostrados nas tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 .

As especificações adotadas para todos os projetos são mostradas a seguir:

- Freqüência: 100kHz
- Forma de onda: Quadrada Simétrica
- Material do núcleo: 3C80

- Temperatura ambiente: 30°C
- Elevação de temperatura: 50°C
- Condutor de cobre cilíndrico.

TABELA 5.1 - Projeto utilizando o núcleo EC-35 da Philips

Enrolamento		Enrolamento				
	Primário	Sec. 1	Sec. 2	Sec. 3	Sec. 4	Sec. 5
Tensão [Vrms]	48	24	24	12	12	5
Corrente [Arms]	7,183	6	6	2	2	1
Nº de espiras	13	7	7	4	4	2
Nº de condutores em paralelo	8	7	7	3	3	2
Potência [VA]	344,8	341				

Ku real = 0,4

TABELA 5.2 - Projeto utilizando o núcleo EC-41 da Philips

Enrolamento		Enrolamento				
	Primário	Sec. 1	Sec. 2	Sec. 3	Sec. 4	Sec. 5
Tensão [RMS]	100	50	40	30	12	5
Corrente [RMS]	5,38	5	4	3	2,4	1
Nº de espiras	21	12	10	7	4	2
Nº de condutores em paralelo	7	7	6	4	4	2
Potência [VA]	538	533,8				

Ku real = 0,4

TABELA 5.3 - Projeto utilizando o núcleo EC-52 da Philips

Enrolamento		Enrolamento				
	Primário	Sec. 1	Sec. 2	Sec. 3	Sec. 4	Sec. 5
Tensão [RMS]	100	50	40	30	20	10
Corrente [RMS]	11,06	10	7	6	5	4
Nº de espiras	15	9	7	6	4	3
Nº de condutores em paralelo	16	14	10	9	7	6
Potência [VA]	1106	1100				

Ku real = 0,4

TABELA 5.4 - Projeto utilizando o núcleo EC-70 da Philips

Enrolamento		Enrolamento				
	Primário	Sec. 1	Sec. 2	Sec. 3	Sec. 4	Sec. 5
Tensão [RMS]	400	96	80	0	0	0
Corrente [RMS]	6,823	20	10	0	0	0
Nº de espiras	44	12	10			
Nº de condutores em paralelo	13	38	19			
Potência [VA]	2729	2720				

Ku real = 0,41

A partir dos resultados obtidos nos projetos apresentados foram montados 4 transformadores. Os resultados mostram que se forem seguidos exatamente os dados anteriores, tem-se os enrolamentos ocupando aproximadamente 100% da área efetiva destinada aos condutores e isolamento. Ou seja, conseguiu-se uma otimização quanto ao aspecto construtivo dos enrolamentos do transformador.

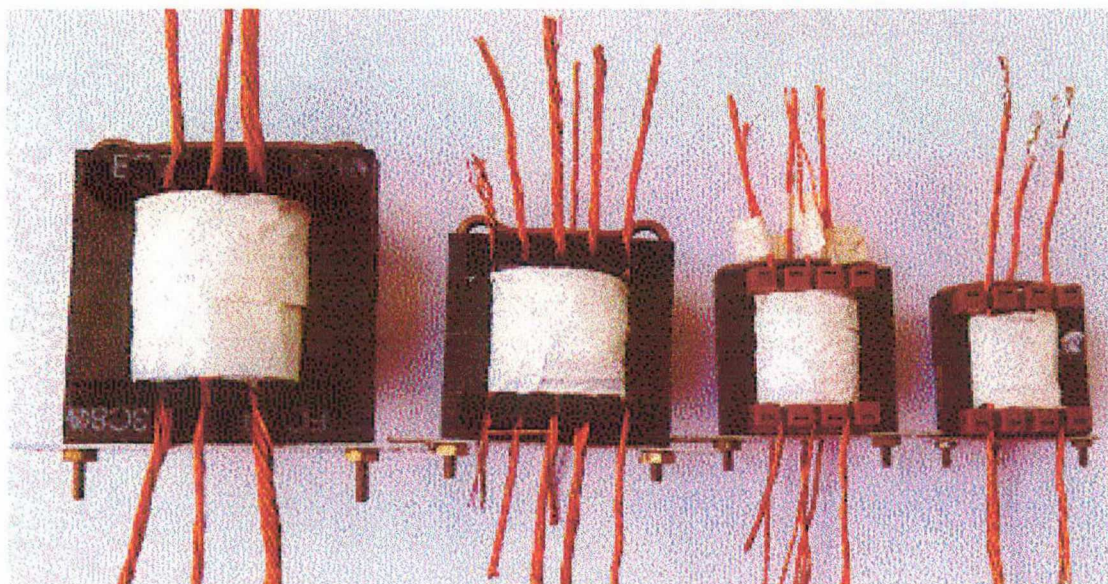
Ensaio feito posteriormente com os transformadores que utilizaram os núcleos EC-35 e EC-41, mostraram um aquecimento acima do esperado, cerca de

110°C, nos enrolamentos destes transformadores, fazendo com que o projeto fosse repensado quanto à temperatura máxima estimada para esta faixa de frequência.

No projeto via programa computacional, o fator K_u não é fornecido pelo usuário, mas calculado, como mostrado anteriormente. Uma observação importante é que este fator K_u após os cálculos chega ao valor de 0,4, valor este utilizado de forma empírica, como parâmetro na maioria dos projetos até então encontrados na literatura. Cabe salientar que, no presente trabalho, este valor é calculado para cada situação, fornecendo como resultado um projeto onde os enrolamentos cabem no núcleo, dispensando o uso de um núcleo maior que o calculado.

A seguir, apresenta-se uma foto dos transformadores montados através dos projetos aqui calculados.

FIGURA 5.1 - Transformadores com núcleos EC da Philips



O principal objetivo da montagem destes transformadores foi testar o funcionamento do programa quanto ao aspecto construtivo, ou seja, verificar se para o núcleo dado era possível alojar os enrolamentos necessários.

Como pode ser observado na figura 5.1, o enrolamento ocupou totalmente a janela do núcleo, não faltando e nem sobrando espaço, demonstrando que a metodologia apresentada é válida e bastante adequada.

5.2 - Ensaio realizados para validação dos projetos feitos via computador

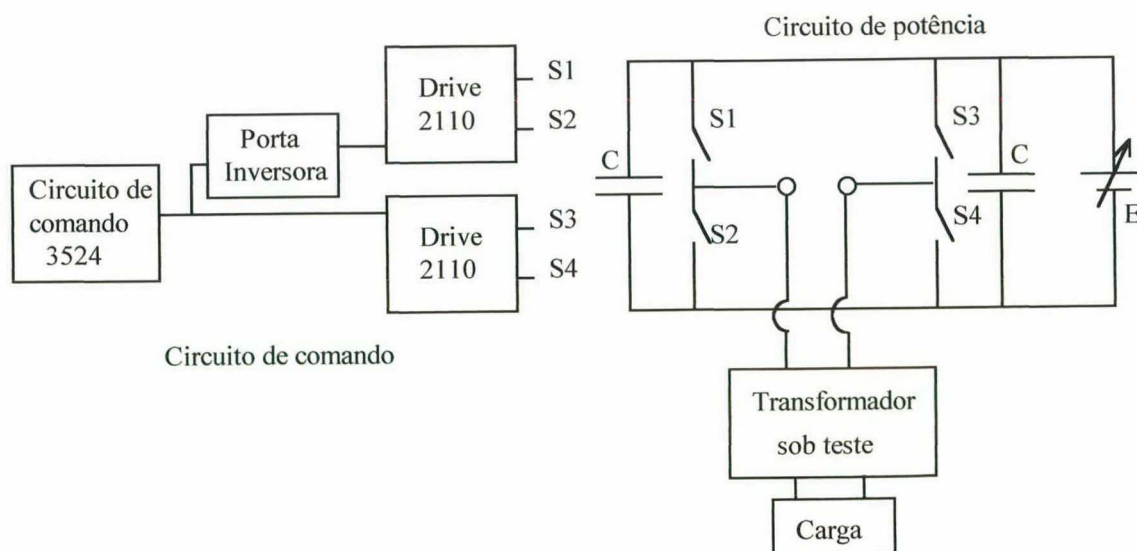
Além dos testes mostrados no item precedente, de natureza estática, é importante verificar o desempenho do elemento magnético em operação.

Assim, para verificar os resultados obtidos através do projeto via programa computacional, fez-se necessária a implementação de um protótipo, com o objetivo de testar uma grande variedade de transformadores.

O protótipo escolhido foi o de um inversor ponte completa com potência de 1500W e frequência de comutação que varia de 20 a 100kHz através de ajuste de alguns componentes. A razão que levou à escolha de um inversor para 1500W, é que com este protótipo pode-se testar uma grande variedade de núcleos. Neste caso, o transformador funciona como isolamento para a carga, bem como ajustador de tensão.

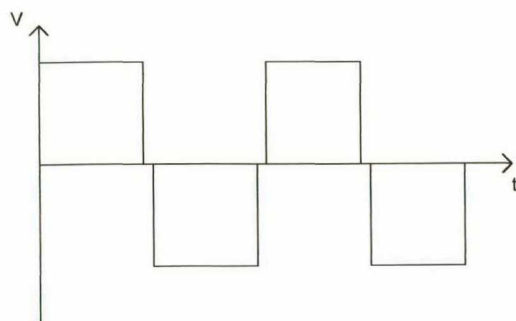
O diagrama esquemático do inversor utilizado é apresentado na figura 5.2.

FIGURA 5.2 - Diagrama do inversor ponte completa



A forma de onda aplicada no transformador é quadrada simétrica, com um pequeno tempo morto. Este tempo morto se faz necessário para evitar um possível curto circuito de braço no inversor.

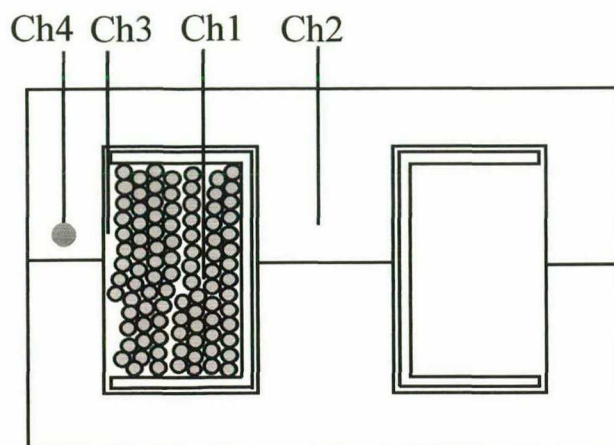
FIGURA 5.3 - Forma de onda aplicada no transformador ($K_v \approx 4$)



A partir da montagem do protótipo diversos ensaios foram executados. Estes ensaios tinham como objetivo principal verificar o funcionamento do transformador no que diz respeito a relações de transformação e elevação da temperatura, visto que, devido às perdas, o aspecto térmico é de fundamental importância nas aplicações em frequências elevadas.

A elevação da temperatura foi verificada em diversos pontos do transformador. Para esta verificação foram utilizados termopares tipo K (alumel-chromel) colocados em 4 pontos distintos, como pode ser visto na figura 5.4. Estes termopares são ligados a uma interface que, ligada a um multímetro, permite uma leitura direta da temperatura, através de conversão direta da escala de milivolt para graus Celsius.

FIGURA 5.4 - Pontos onde foram colocados os termopares.



- O termopar 1 (ch1) está colocado no interior dos enrolamentos, supostamente o ponto de maior temperatura dos condutores;
- O termopar 2 (ch2) está fixado na superfície da coluna central do núcleo, definido normalmente como o ponto mais quente do elemento magnético (Tp);
- O termopar 3 (ch3) está fixado à superfície externa dos condutores;
- O termopar 4 (ch4) é colocado na superfície da perna lateral do núcleo magnético.

Além destes 4 pontos, um termopar foi utilizado para medir a temperatura próximo ao transformador (aproximadamente 3 cm), com o intuito de verificar se a temperatura dissipada por este afetaria um componente que estivesse próximo, ou influenciaria na elevação da temperatura no transformador. Foi também utilizado um termômetro para medir a temperatura ambiente.

Os 5 termopares foram ligados a um dispositivo, que fez a leitura de todos os pontos ao mesmo tempo, e permitiu o acesso aos valores lidos através do uso de um multímetro digital.

5.3 - Resultados Experimentais

5.3.1 - Formas de onda no inversor

As formas de onda que serão apresentadas a seguir, foram obtidas do inversor operando em 100kHz, sem carga nos seus terminais.

FIGURA 5.5 - Tensão nos gates das chaves S2 e S4

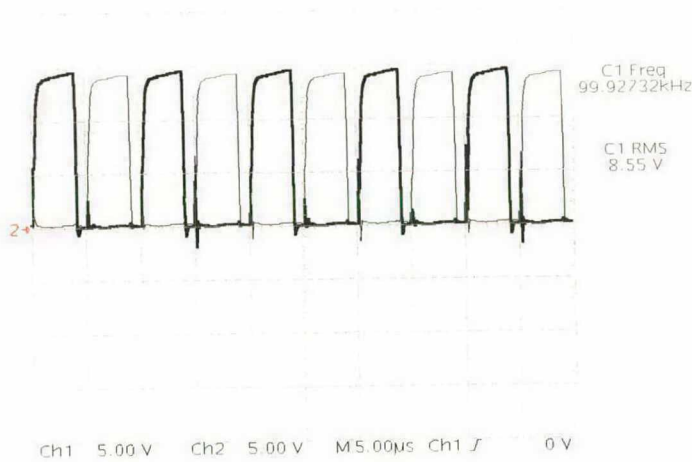
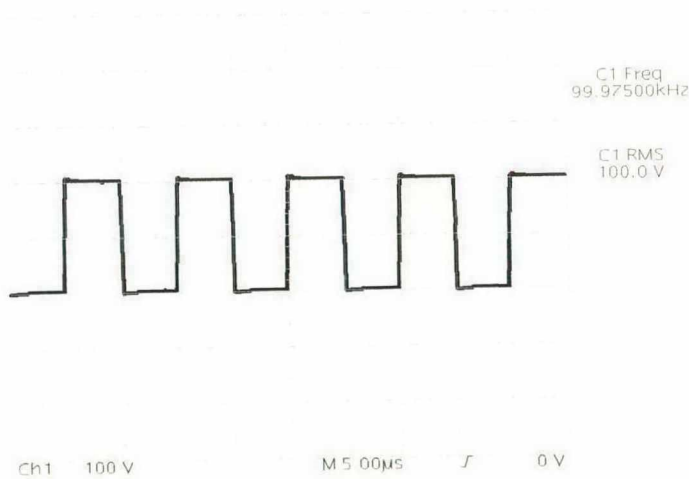


FIGURA 5.6 - Tensão nos terminais de saída do inversor



A forma de onda mostrada na figura 5.6 é aquela que será aplicada no enrolamento primário do transformador.

5.3.2 - Resultados obtidos nos ensaios com transformadores

5.3.2.1 - Ensaio nº 1 - Transformador de 143W - 50kHz

Especificações gerais

Núcleo utilizado: EC35 (Philips)

Material do núcleo: 3C80

Condutores cilíndricos de Cobre

Especificações elétricas

Os valores nominais de projeto são mostrados na tabela 5.5. Cabe salientar que tanto a corrente no primário, nas especificações elétricas, quanto a elevação da temperatura, nas especificações térmicas, são valores obtidos através do programa computacional.

Tabela 5.5 - Valores nominais para o ensaio nº 1

	Primário	Sec.1	Sec. 2
Tensão (Vrms)	50	33	22
Corrente (Arms)	2,9	3	2

Especificações térmicas

Elevação de temperatura: 33,8°C

Temperatura ambiente: 25°C

Como exemplo do que foi mencionado anteriormente, neste projeto a elevação de temperatura estimada era de 35°C, e o programa teve como resultado uma elevação de temperatura real de 33,8°C. Este valor de temperatura estimada foi escolhido para testar o componente magnético em temperaturas inferiores àquela prevista para mínimas perdas. Em ensaio anterior, quando utilizou-se a temperatura

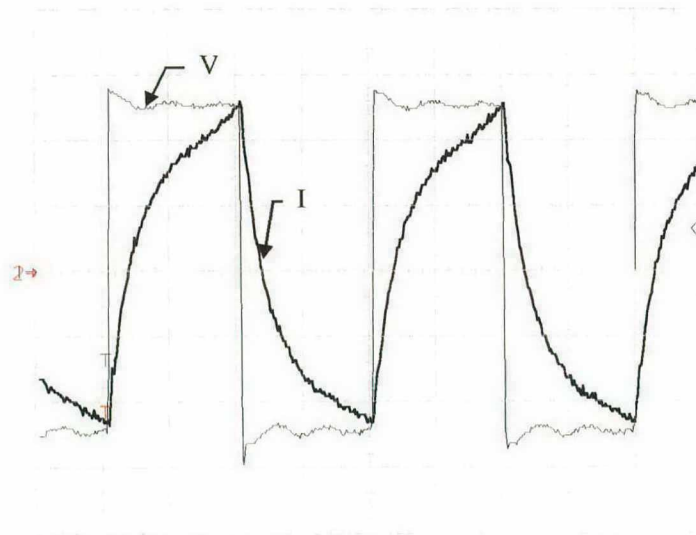
para mínimas perdas, houve um aumento da temperatura nos enrolamentos acima do desejado.

Resultados obtidos experimentalmente

Ensaio elétrico

Na figura 5.7 são mostradas as formas de onda de tensão e corrente observadas no enrolamento primário do transformador.

FIGURA 5.7 - Tensão e corrente no enrolamento primário do transformador

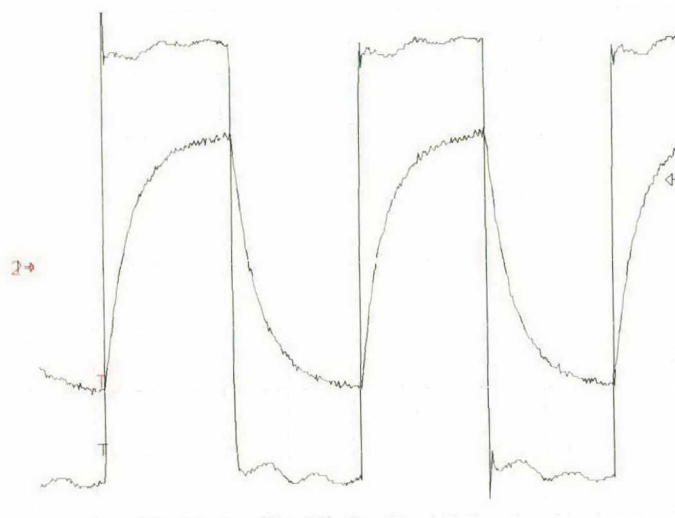


Escala: Tensão: 20V/div Corrente: 2A/div

Escala de tempo: 5 μ s/div

A figura 5.8 mostra a tensão e a corrente no enrolamento secundário 1 do transformador, enquanto na figura 5.9 podem ser vistas a tensão e a corrente no secundário 2.

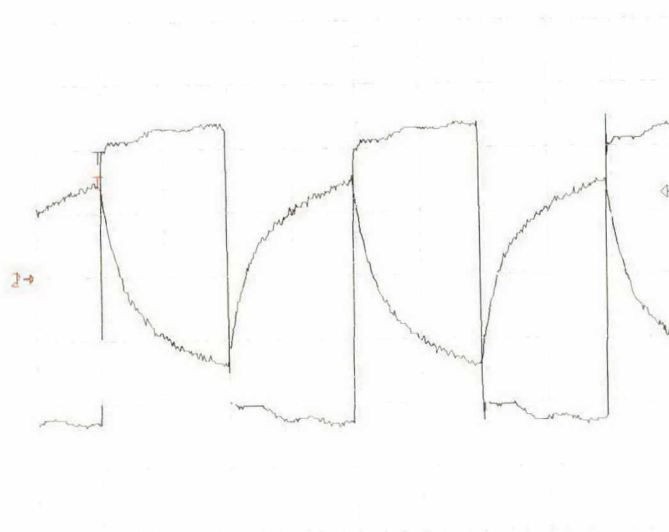
FIGURA 5.8 - Tensão e corrente no enrolamento secundário 1 do transformador



Escalas: Tensão: 10V/div Corrente: 2A/div

Escala de tempo: 5 μ s/div

FIGURA 5.9 - Tensão e corrente no enrolamento secundário 2 do transformador



Escalas utilizadas:

Tensão: 10V/div Corrente: 2A/div

Escala de tempo: 5 μ s/div

Na tabela 5.6 são apresentados os valores de tensões e correntes obtidos experimentalmente.

Tabela 5.6 -Valores de tensões e correntes obtidos experimentalmente

	Primário	Sec 1	Sec 2
Tensão [V rms]	50	33,7	22,1
Corrente [A rms]	3,35	3,1	2

Ensaio térmico

O ensaio térmico foi feito com o transformador operando com os valores de tensões e correntes mostrados na tabela 5.6.

Um gráfico mostrando a evolução da temperatura nestes diversos pontos é apresentado na figura 5.10.

FIGURA 5.10 - Temperatura em diversos pontos do transformador

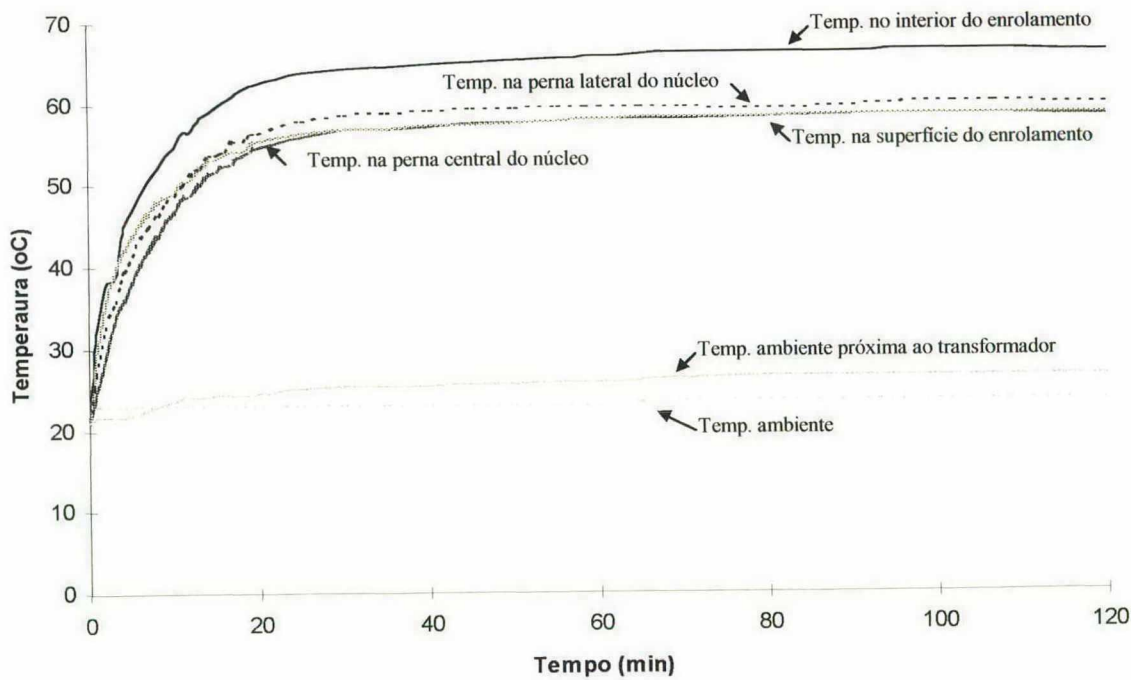


Tabela 5.7 - Valores de temperatura em regime

Temperatura no interior do enrolamento:	66,5 °C
Temperatura no interior do núcleo:	59,5°C
Temperatura na parte externa do enrolamento:	58,5°C
Temperatura na parte externa do núcleo:	58,5°C
Temperatura próximo ao transformador:	26,6°C
Temperatura ambiente:	23,5°C

Conclusões

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que as tensões e correntes medidas nos enrolamentos secundários estão de acordo com as nominais de projeto. Já a corrente no enrolamento primário mostra-se mais elevada, fato que ocorreu devido às perdas serem maiores que as esperadas.

No gráfico das temperaturas pode-se observar que a mais elevada delas está no interior do enrolamento, ou seja, as perdas de potência por efeito Joule são maiores que as perdas magnéticas. Este fato já foi observado anteriormente, no projeto feito pelo computador.

Pelo fato de se utilizar como carga um banco de resistências, a forma de onda da corrente deveria seguir o sinal da tensão. Neste ensaio, isto não ocorre devido ao fato da componente indutiva destas resistências ser muito alta, já que estas resistências são feitas de fio em forma de uma bobina (fio enrolado). Este efeito torna-se muito acentuado na frequência em que se está trabalhando, como pode ser observado na forma de onda da corrente (Figuras 5.7, 5.8 e 5.9).

5.3.2.2 - Ensaio nº 2 - Transformador de 300W - 50kHz

Para este ensaio, bem como para os seguintes, não serão mais feitos comentários gerais como os do ensaio anterior, restringindo-se a partir deste momento somente a resultados, conclusões e comentários particulares a cada ensaio.

Especificações gerais

Núcleo utilizado: E42/20 (Thornton)

Material do núcleo: IP6

Condutores cilíndricos de Cobre

Especificações elétricas

Tabela 5.8 - Valores nominais de tensão e corrente

	Primário	Sec.1
Tensão (Vrms)	100	220
Corrente (Arms)	3,016	1,36

Neste ensaio foi utilizado como carga um banco de lâmpadas incandescentes, 5 lâmpadas de 60W, justificando assim as especificações da tabela 5.8.

Especificações térmicas

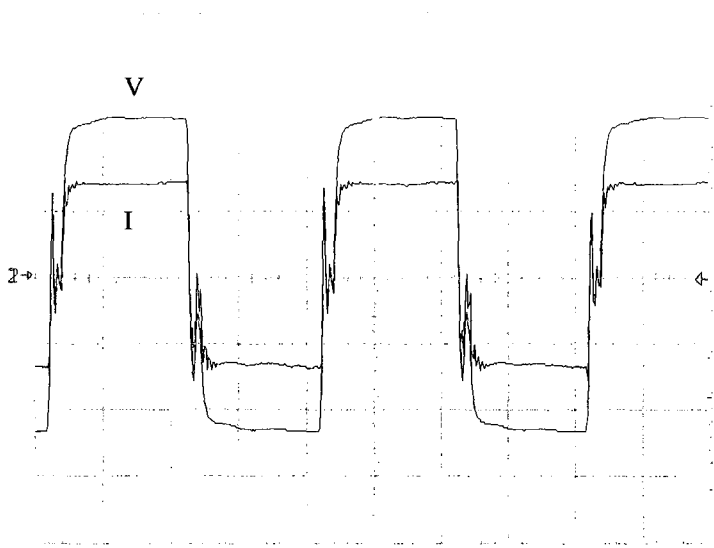
Elevação de temperatura: 18,15°C

Temperatura ambiente: 25°C

Resultados obtidos experimentalmente

Ensaio Elétrico

FIGURA 5.11 - Tensão e corrente no enrolamento secundário do transformador



Escalas: Tensão: 100V/div Corrente: 1A/div
Escala de tempo: 5μs/div

A forma de onda para o enrolamento primário é semelhante ao da figura 5.11, alterando-se apenas os valores.

Tabela 5.9 - Tensões e correntes obtidas experimentalmente

	Primário	Sec 1
Tensão [V rms]	100,6	220
Corrente [A rms]	3,018	1,318

Ensaio térmico

Neste ensaio, a temperatura foi lida apenas quando o transformador já havia atingido o regime térmico. As medidas não foram feitas em diversos momentos, pelo fato da alta frequência, associada a uma potência mais elevada, interferir nos valores. Isto decorria em função da medição da temperatura ser feita por aparelhos eletrônicos, observando-se indiretamente uma interferência eletromagnética.

Assim, ao atingir o regime térmico o inversor é desligado e imediatamente é feita a leitura dos valores, apresentados na tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Valores de temperatura em regime

Temperatura no interior do enrolamento:	61,5 °C
Temperatura no interior do núcleo:	52,0°C
Temperatura na parte externa do enrolamento:	51,2°C
Temperatura na parte externa do núcleo:	49,0°C
Temperatura próximo ao transformador:	30,0°C
Temperatura ambiente:	25,0°C

Conclusões

A exemplo do ensaio anterior, os valores de tensão e corrente ficaram de acordo com os valores nominais.

5.3.2.3 - Ensaio nº3 - Transformador de 600W - 100kHz.

Especificações gerais

Núcleo utilizado:E42/20 (Thornton)

Material do núcleo utilizado: IP12

Condutores cilíndricos de Cobre

Especificações elétricas

TABELA 5.11 - Valores nominais de tensão e corrente

	Primário	Sec.1	Sec.2
Tensão (Vrms)	100	220	220
Corrente (Arms)	6,006	1,36	1,36

Especificações térmicas

Elevação de temperatura: 25 °C

Temperatura ambiente: 25°C

Resultados obtidos experimentalmente

Ensaio elétrico

TABELA 5.11 - Valores de tensões e correntes obtidos experimentalmente

	Primário	Sec.1	Sec.2
Tensão (Vrms)	100,1	220	220,3
Corrente (Arms)	6,3	1,3016	1,32

Ensaio térmico

TABELA 5.12 - Valores de temperatura em regime

Temperatura no interior do enrolamento:	100,1°C
Temperatura no interior do núcleo:	67,2°C
Temperatura na parte externa do enrolamento:	80,4°C
Temperatura na parte externa do núcleo:	86,5°C
Temperatura próximo ao transformador:	32°C
Temperatura ambiente:	25°C

Conclusões

As temperaturas obtidas encontram-se acima dos valores estimados. Pode-se observar, também neste caso, que a maior temperatura está no enrolamento, em virtude do que já foi explicado no ensaio nº1.

5.3.2.4 - Ensaios nº4, nº5 e nº6 - Transformador de 300W - 100kHz

Através destes ensaios procurou-se fazer uma comparação em função dos diferentes tipos de materiais magnéticos, todos do mesmo fabricante (Thornton).

O projeto utilizado nos 3 ensaios foi o mesmo, apenas alterando-se o núcleo magnético.

Especificações gerais

Núcleo utilizado:E42/20 (Thornton)

Projetado para material IP6

Material do núcleo utilizado: IP6, IP10 e IP12

Condutores cilíndricos de cobre

Especificações elétricas

TABELA 5.13 - Valores nominais de tensão e corrente

	Primário	Sec.1
Tensão (Vrms)	100	220
Corrente (Arms)	3,005	1,36

Especificações térmicas

Elevação de temperatura: 12,16 °C

Temperatura ambiente:25,0 °C

Resultados obtidos experimentalmente

Ensaio elétrico

TABELA 5.14 - Valores de tensão e corrente obtidos experimentalmente

	Primário	Sec.1
Tensão (Vrms)	100	218
Corrente (Arms)	3,03	1,32

Ensaio térmico

TABELA 5.15 - Valores de temperatura em regime

	IP6	IP10	IP12
Temperatura no interior do enrolamento:	99°C	93,9°C	85,7°C
Temperatura no interior do núcleo:	96°C	90,6°C	87,3°C
Temperatura na parte externa do enrolamento:	80,4°C	78°C	71,3°C
Temperatura na parte externa do núcleo:	80°C	71,7°C	64,3°C
Temperatura ambiente:	23°C	23,2°C	23,1°C

Conclusões

Novamente pode ser observada uma elevação de temperatura acima da estimada, com diferentes valores para os diferentes materiais. De acordo com o esperado, o núcleo de pior qualidade teve um maior aquecimento.

5.3.2.5 - Ensaio n°7 e n°8 - Transformador de 180W - 100 e 50kHz

Este ensaio foi realizado para verificar a influência da frequência na elevação da temperatura. Neste caso, manteve-se o mesmo projeto para os 2 ensaios, alterando-se apenas a frequência de comutação.

Especificações gerais

Núcleo utilizado: EC52 (Philips)

Projetado para material 3C80 à 100kHz

Material do núcleo utilizado: 3C80

Condutores cilíndricos de Cobre

Especificações elétricas

TABELA 5.16 - Valores nominais de tensão e corrente

	Primário	Sec.1
Tensão (Vrms)	100	220
Corrente (Arms)	1,812	0,82

Especificações térmicas

Elevação de temperatura: 11,13°C

Temperatura ambiente: 25,0 °C

Resultados obtidos experimentalmente

Ensaio elétrico

Os resultados obtidos no ensaio elétrico estão de acordo com as especificações apresentadas na tabela 5.16.

Ensaio térmico

TABELA 5.15 - Valores de temperatura em regime

	100kHz	50kHz
	3C80	3C80
Temperatura no interior do enrolamento:	68,2°C	44,3°C
Temperatura no interior do núcleo:	53°C	41,2°C
Temperatura na parte externa do enrolamento:	54°C	40,8°C
Temperatura na parte externa do núcleo:	41°C	37,8°C
Temperatura próximo ao transformador:	28°C	28°C
Temperatura ambiente:	25°C	25°C

Conclusões

Como pode ser observado, quando a frequência passa de 100 para 50 kHz, há uma diminuição na elevação da temperatura, em função das perdas serem menores neste último caso.

Considerando-se que o projeto é o mesmo, com resistência CC não alterada, a diferença se dá pela diminuição das perdas Joule devido à resistência CA e pela diminuição das perdas magnéticas. A maior diferença, no entanto, é devido à diminuição das perdas pela resistência CA, visto que a elevação de temperatura é maior nos enrolamentos do que no núcleo.

5.3.2.6 - Ensaio n° 9 e n°10 - Transformador de 300W - 50kHz.

Estes ensaios foram feitos com o objetivo de verificar os resultados obtidos através de projetos feitos com diferentes formas de calcular os condutores. Uma das formas de cálculo consiste em utilizar a própria frequência de comutação no cálculo dos condutores e a outra consiste em utilizar uma frequência 5 vezes maior que a de comutação.[12]

Especificações gerais

Núcleo utilizado: E42/20 (Thornton)

Material do núcleo utilizado: IP12

Condutores cilíndricos de Cobre

Especificações elétricas

TABELA 5.16 - Valores nominais de tensão e corrente

	Primário	Sec.1
Tensão (Vrms)	100	220
Corrente (Arms)	3,016	1,36

Especificações térmicas

Elevação de temperatura: 18,15°C

Temperatura ambiente: 25,0°C

Resultados obtidos experimentalmente

Ensaio térmico

Na tabela 5.17, são apresentados os resultados das medidas de temperatura dos ensaios feitos com projetos, usando a frequência de comutação no cálculo dos

condutores (1), e usando uma frequência 5 vezes maior que a frequência de comutação no cálculo dos condutores (2).

TABELA 5.17 - Valores de temperatura em regime

	IP12 (1)	IP12 (2)
Temperatura no interior do enrolamento:	61,4°C	48,0°C
Temperatura no interior do núcleo:	65,1°C	43,9°C
Temperatura na parte externa do enrolamento:	54,1°C	49,6°C
Temperatura na parte externa do núcleo:	59,1°C	40,6°C
Temperatura próximo ao transformador:	30,0°C	27,0°C
Temperatura ambiente:	25,0°C	24,5°C

Conclusões

Comparando-se os resultados dos dois ensaios, constata-se que ao modificar a forma de calcular os condutores, obtém-se uma redução na temperatura, como pode-se observar na tabela 5.18.

TABELA 5.18 - Redução na elevação de temperatura

Redução da temperatura (%)	
no interior do enrolamento:	21,82
no interior do núcleo:	32,56
na parte externa do enrolamento:	8,31
na parte externa do núcleo:	30,79

Neste último ensaio, a temperatura medida está de acordo com a estimada, ou seja, esperava-se uma temperatura de 43.15°C no interior do núcleo do transformador, a uma temperatura ambiente de 25°C, e obteve-se uma temperatura de 43,9°C .

CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho apresentou uma nova metodologia de projeto de transformador para uso em alta frequência, baseada em estudos analíticos considerando os principais parâmetros envolvidos, bem como sua implementação em um programa computacional.

Como mostrado no decorrer do trabalho, vários parâmetros importantes, em geral desprezados em projetos convencionais, foram considerados para a execução de um projeto adequado, como o material do núcleo magnético, os efeitos que ocorrem devido à alta frequência, a elevação de temperatura, o fator de utilização da janela do núcleo, etc.

A seqüência dos cálculos feita pelo programa, bem como os dados utilizados para o projeto, são mostrados nos capítulos 2 e 3, comprovando-se que seria extremamente trabalhoso fazê-los manualmente.

Um exemplo de projeto completo é apresentado no capítulo 4, podendo servir como guia para o primeiro projeto feito pelo usuário, visto que após este adquire-se familiaridade com o programa, em função da facilidade de se trabalhar com o mesmo.

No capítulo referente aos resultados experimentais, observou-se que o programa apresenta resultados confiáveis, apesar dos dados utilizados serem obtidos de catálogos de fabricantes e não experimentalmente, o que pode apresentar alguns resultados discrepantes.

Com o auxílio deste programa muitos outros dados poderão ser obtidos em trabalhos futuros, como por exemplo: o comportamento dos transformadores para

diferentes formas de onda; o formato adequado para os núcleos, já que, como foi visto, estes não operam com a potência máxima que poderiam devido à falta de espaço para o enrolamento; a frequência ideal de trabalho, avaliando rendimento, temperatura e volume; bem como a análise de outros perfis de condutores, tais como laminares, retangulares e litz.

Finalizando, um dos principais objetivos para a implementação computacional de um projeto deste tipo, que era a sua facilidade, foi alcançado. Através do programa apresentado, o projeto pode ser feito em menos de 1 minuto sem qualquer outra ferramenta em mãos. Ainda tem-se a possibilidade de fazer diversos projetos até encontrar um que se adapte à situação desejada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]BARBI, I. Projeto de Fontes Chaveadas. Publicação interna. INEP/UFSC, 1990.
- [2]BATISTA, A. J.. Modelagem e otimização do projeto de componentes magnéticos utilizados em conversores estáticos de alta frequência. Projeto de tese de doutorado. INEP/UFSC. 1996.
- [3]BORLAND DELPHI Version 2. User's Guide. Borland International, 1996.
- [4]CANTÚ, M.. Dominando o Delphi. Trad. José Carlos Barbosa dos Santos e Flavio Deny Steffen.São Paulo: Makron Books, 1996.
- [5]Catálogo de Ferrites. Thornton Inpec Eletrônica Ltda. 1994.
- [6]COLEMAN, Jim C.. - CAD Software and Experience Cut High Power Transformer Design Time and Cost. PCIM. p. 50-53. Abril 1992.
- [7]DOWEL, P.L.. Effects of eddy currents in transformer windings. Proc. IEE, vol. 113, Nº. 8, p. 1387-94, August 1966.
- [8]FAGUNDES, J.C.. Estudo de parâmetros para projeto de componentes magnéticos em alta frequência. Relatório de estágio pós-doutoral. CNPq, 1996.
- [9]FAGUNDES, J.C.; EBERT, C.L.; VIAROUGE, P. .Transformer design for high frequency static converters using Microsoft Excel. COBEP'95. p. 307-311.
- [10]FAGUNDES, J.C.; EBERT, C.L.; VIAROUGE, P.; CROS, J.. C.A.D. in high frequency transformers for estatic converters application. ISTET'97. p. 56-59. Palermo, Italy.
- [11]GU, W. J. . A study of volume and weight vs. Frequency for high-frequency transformers.. PESC'93. p. 1123-1129.
- [12]INGRAM, Gary L.. CAE Aids Optimum Inductor/Transformer Design. PCIM. p. 26-30 Setembro 1993.

- [13]JONGSMA, J.. Transformer winding design. 3C85 Handbook. Philips Export B.V. 1987
- [14]MCLYMAN, C.Wm.T.. Transformer and Inductor design handbook. Marcel Dekker Inc., NY-USA, 1988.
- [15]MCLYMAN, C. Wm. T.. Designing magnetic components for high frequency dc-dc converters. Ed. Kg Magnetics, Inc., Michigan - USA. 1993.
- [16]MULDER, Steef A.. Loss formulas for power ferrites and their use in transformer design. Philips Components. Fevereiro 1994.
- [17]SEVERNS, Rudy. HF Core Losses For Non-Sinusoidal Wave Forms. HFPC Proceedings. p. 140-148. Junho 1991.
- [18]SNEELING, E. C.. Soft Ferrites - properties and applications. Butterworths publishing, 1988, Stoneham, MA02180.
- [19]Soft Ferrite Materials Selection Guide. Philips Components
- [20]UNITRODE CORPORATION. Switching Regulated Power Supply Design. Seminar Manual. 1986.
- [21]VIAROUGE, P. Eléments de dimensionnement des composants magnétiques en électronique de puissance. Raport RHAE/CNPq LAMEP, Florianópolis/SC - Brasil, 1994.